



이학박사 학위논문

유네스코 생물권보전지역 광릉 낙엽활엽수 노령림의 생태계 온전성 평가: 열역학적 관점

Ecosystem integrity assessment of Gwangneung deciduous old-growth forest in UNESCO Biosphere Reserve: A thermodynamic perspective

2023년8월

서울대학교 대학원

협동과정 농림기상학 전공

양현영

유네스코 생물권보전지역 광릉 낙엽활엽수 노령림의 생태계 온전성 평가: 열역학적 관점

지도교수 김 준 이 논문을 이학박사 학위논문으로 제출함 2023 년 5 월

> 서울대학교 대학원 협동과정 농림기상학 전공 양 현 영

양현영의 이학박사 학위논문을 인준함 2023 년 7 월

| 위 | 원 | 장 | 김 | 현 | 석 | (인) |
|----|-----|----|-------|---|----|------|
| | | | | | | |
| 부의 | 위 원 | 장 | 김 | | 준 | (인) |
| | | _ | | | | |
| 위 | | 원 | 임 | 상 | えて | (인) |
| 0] | | 0] | ᅯ | 저 | 히. | (ol) |
| П | | 펀 | 뀐 | Ő | 쐬 | (빈) |
| 위 | | 원 | 강 | 민 | 석 | (인) |

국문초록

유네스코 생물권보전지역 광릉 낙엽활엽수 노령림의 생태계 온전성 평가: 열역학적 관점

양현영

유네스코 생물권보전지역(Biosphere Reserve, BR)은 지속가능한 발전을 위한 배움터이다. 이곳은 기후 및 환경 변화에 따른 생태-사회시스템의 반응과 적응 과정을 이해하고 온전하게 관리하기 위한 초학문적 접근 방법을 적용함으로써, 전지구적 지속가능성의 문제에 대한 지역 차원의 해결책을 제공한다. BR 에서의 궁극적인 도전 과제는 생태계 온전성(ecosystem integrity)을 저하시키지 않으면서 생태계 서비스의 지속가능한 이용과 생물다양성의 보전을 조화시키는 것이다. 따라서 생태계 온전성의 정량적인 평가와 지속적인 모니터링이 필요하나, 온전성의 정의의 모호함과 계량의 기반이 되는 이론적 프레임워크 및 체계적인 장기 관측 자료의 부재가 걸림돌이 되고 있다.

문헌조사를 기반으로 한생태계 온전성의 정의는 크게 두 가지 관점, 즉(1) 기준상태(reference state) 관점과 (2) 열역학적(thermodynamic) 관점으로 요약할 수 있다. 전자의 경우 생태계의 상태가 기준상태와 비교하여 다르지 않게 보전됨을 온전성으로 정의하는 반면, 후자는 생태계가 자기-조직화(self-organization) 역량을 갖춘 상태로 정의한다. 여기서 자기-조직화란 시스템을 구성하고 있는 요소들 간의 상호작용을 통해 시스템 전체의 질서를 만들기 위해 집단 행동을 조직화 함으로써, 시스템 내부의 엔트로피 축적을 최소화하는 과정이다. 생태계의 자기-조직화는 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피(entropy production, σ)와 시스템 밖으로 수송된 열역학 엔트로피(entropy transfer, *J*)의 비율, 즉 |*J*/σ|로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 기준상태 관점과 열역학적 관점을 함께 고려하여, 생태계 온전성을

i

·생태계의 자기-조직화 역량이 기준상태의 그것과 유의하게 다르지 않은 상태'로 정의하였다.

재정의된 생태계 온전성을 평가할 연구 대상지로서 유네스코 BR 의 하나인 한국 광릉 낙엽활엽수 노령림(Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea, GDK)을 선택하였다. GDK 는 한국의 타워 기반의 플럭스 모니터링 네트워크(KoFlux)의 주요 관측지로서 광릉숲 BR 의 핵심구역(core zone) 내에 위치하며, 2005 년부터 열역학 엔트로피 계산에 필요한 복사 및 지표 에너지 수지와 기온을 포함한 다양한 생물기상 변수들이 현재까지 체계적으로 관측되고 있다. 본 연구에서는 GDK 가 BR 로 지정된 2010 년을 기준으로 그 이전 5 년(2006-2010 년)을 기준상태로 가정하여 자기-조직화를 정량화하고 그 특징을 파악하는 기간으로 사용하였다. 그 이후 10 년(2011-2020 년)을 5 년씩 두 기간으로 나누어 시험 기간으로 정하고 각 기간의 자기-조직화를 정량화 하여 기준상태의 그것과 비교함으로써, 'GDK 에서 생태계 온전성이 유지되고 있는가?'라는 질문에 답하고자 하였다.

분석 결과, 기준상태 기간 동안의 σ는 평균 13.8±0.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, *J*는 -10.4±0.5 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹이었고, |*J*/σ|는 0.76±0.01 이었다. 노령림인 GDK 는 기준상태 기간 동안 생성된 열역학 엔트로피의 74-77%를 밖으로 수송함으로써 생태계 내의 열역학 엔트로피 축적을 제어하는 일관성 있는 자기-조직화 역량을 보였다. 첫번째 시험 기간인 2011-2015 년에는 *J*가 일정한 반면에 σ가 지속적으로 증가하여 |*J*/σ|는 감소하는 경향을 보였지만 유의한 차이는 없었다. 그러나 두번째 시험 기간인 2016-2020 년에도 이러한 감소가 지속되어 |*J*/σ|가 통계적으로 유의한 차이를 보임으로써, GDK 의 온전성이 최근에 저하되고 있음을 나타냈다.

자기-조직화 역량이 저하되는 원인을 파악하기 위해, 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들의 2006-2020 년 기간의 시계열 자료와 \J/ol의 변화 간의 상관관계를 살펴보았다. 하향단파복사 대비 순복사(즉 에너지 포획)와 생물량

ii

대비 호흡량은 |J/ਗ਼와 음의 상관관계를 보였고, 교목의 종다양성의 변화는 |J/ਗ਼와 양의 상관관계를 보였다.

위 결과를 더 면밀히 검토하기 위해, σ 와 J 각각의 30 분 단위 시계열 자료에서 정보 엔트로피를 계산하여 불확정성의 변화를 살펴 보았다. 기준상태 기간에 비해 시험 기간 동안에 σ 와 J 의 불확정성이 증가하였고, 그 증가폭은 σ 가 J 보다 더 컸다. 불확정성의 증가는 자기-조직화의 감소를 의미하므로, 온전성의 저하는 내부 엔트로피의 생성과 관련된 자기-조직화가 상대적으로 더 감소했기 때문으로 보인다.

종합적으로 GDK 에서 관측된 15 년 간의 환경 변화 및 생태계의 반응을 정리하면, |*J*/σl의 감소는 노령림인 GDK 에 유입 및 포획된 에너지의 증가로 인해 시스템 내의 σ가 증가한 반면, 이를 시스템 외부로 수송하는 *J*가 함께 증가하지 못한 결과였다. 강수량의 꾸준한 감소로 인한 에너지 유입의 지속적인 증가와 이에 대한 노령림의 반응이 자기-조직화 역량의 감소를 초래한 원인으로 보인다.

요약하자면, 본 연구에서는 기준상태와 자기-조직화 역량을 기반으로 생태계 온전성을 재정의하였다. BR 내 GDK 에서 15 년간 관측된 에너지 플럭스 자료를 사용하여 열역학 엔트로피를 분석한 결과, 온정성의 정량적 평가가 가능할 뿐 아니라 생태계의 총체적인 상태 변화를 지속적으로 모니터링할 수 있는 중요한 척도가 될 수 있음을 보였다. 또한 열역학 엔트로피의 시계열로부터 계산된 정보 엔트로피가 자기-조직화를 나타내는 또 다른 척도가 될 수 있음을 보였다. GDK 의 온전성 저하의 원인 구명과 이에 따른 후속 관리를 위해 지속적인 엔트로피 모니터링이 요구된다. 후속 연구로서 GDK 노령림에 대한 이러한 결과가 다른 노령림 그리고 임령과 수종이 다른 산림에서 일관성 있게 나타나는지 확인이 필요하다. 이 연구에서 제시한 온전성 평가 및 모니터링의 유용성 및 확장성이 검증된다면, '생물권 안에서 조화롭게 변영하는 사회'라는 BR 의 미션을 실현하는데 핵심 도구로 기여할 수 있을 것이다.

iii

- **주 요 어:** 생태계 온전성, 유네스코 생물권보전지역, 열역학 엔트로피, 정보 엔트로피, 자기-조직화, 플럭스 관측
- **학** 번: 2019-38099

목 차

| 국문초록 | i |
|-----------------------|-----|
| 목 차 | V |
| 표 목차 | vii |
| 그림 목차 | ix |
| 1. 서 론 | 1 |
| 1.1. 연구 배경 및 문제 제시 | 1 |
| 1.2. 생태계 온전성의 정의 | 3 |
| 1.3. 이론적 프레임워크 | |
| 1.4. 연구 질문 | |
| 2. 재료 및 방법 | 14 |
| 2.1. 연구 대상지 | 14 |
| 2.2. 생물기상 관측 | 20 |
| 2.2.1. 이론적 배경 | 20 |
| 2.2.1.1. 에디-공분산 관측 | 20 |
| 2.2.1.2. 복사 및 에너지 수지 | 21 |
| 2.2.1.3. 열역학 엔트로피 수지 | |
| 2.2.2. 플럭스 및 환경 요인 관측 | |
| 2.2.3. 관측 자료의 처리 | |
| 2.3. 자기-조직화 | |
| 2.4. 통계 분석 | |
| 3. 결 과 | |
| 3.1. 환경 요인 | |
| 3.1.1. 기준상태 기간 | |
| 3.1.2. 시험 기간 | |
| 3.2. 복사 수지 | |
| 3.2.1. 기준상태 기간 | |

| 3.2.2. 시험 기간 |
|--|
| 3.3. 에너지 수지 |
| 3.3.1. 기준상태 기간 |
| 3.3.2. 시험 기간 |
| 3.4. 열역학 엔트로피 수지40 |
| 3.4.1. 기준상태 기간40 |
| 3.4.2. 시험 기간40 |
| 3.5. 자기-조직화44 |
| 3.5.1. 기준상태 기간44 |
| 3.5.2. 시험 기간44 |
| 3.6. 통계 분석47 |
| 4.논의 |
| 5. 요약 및 결론60 |
| 참고문헌64 |
| 부 록 |
| Appendix 1. 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수 |
| Appendix 2. 광릉숲이 유네스코 생물권보전지역으로 등재된 이유82 |
| Appendix 3. 지중열 계산85 |
| Appendix 4. 생물량 저류항 계산86 |
| Appendix 5. 환경 요인, 복사, 에디-공분산 플럭스 자료의 불확도 |
| Appendix 6. GDK 의 주변 기상관측소에서 관측한 환경 요인 |
| Appendix 7. 정보 엔트로피 계산89 |
| Appendix 8. 자료 개수에 따른 정보 엔트로피의 민감도 테스트 |
| Appendix 9. 후속 연구95 |
| Abstract |
| 감사의 글101 |

표목차

- Table 1. Definitions of ecosystem integrity suggested by previous studies7

그림 목차

| Figure 1. | . Three zones and functions of the UNESCO Biosphere Reserve (UNES | CO, |
|-----------|---|-----|
| | 2023) | 2 |

- Figure 3. Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) panoramic view, (b) an old *Quercus serrata* with 500 mm in diameter at breast height, (c) large dead trees, (d) forest gap caused by dead trees, (e) dominant species *Q. serrata*, (f) dominant species *Carpinus laxiflora*......15

- Figure 6. Annually integrated or averaged environmental factors from 2006 to 2020 observed in the Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK) (a) precipitation (*PPT*), (b) incoming shortwave radiation (*Rs* ↓), (c) air temperature (*Tair*), (d) soil water content (*SWC*), and (e) vapor pressure deficit (*VPD*). (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.).33

- Figure 8. Annually integrated energy balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) net radiation (Rn), (b) latent heat flux (LE), (c) sensible heat flux (H), (d) ground heat flux (G), (e) biomass heat storage (B), and (f) energy balance ratio (EBR). (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.).39

1.서 론

1.1. 연구 배경 및 문제 제시

유네스코 생물권보전지역(Biosphere Reserve, BR)은 다양한 생태, 사회, 경제적 맥락에서 지속가능한 발전을 위한 배움터이다. 이곳은 기후 및 환경 변화에 따른 생태-사회시스템의 반응 및 적응 과정을 이해하고 온전하게 관리하기 위한 초학문적 접근 방법을 적용함으로써, 전지구적 지속가능성의 문제에 대한 지역 차원의 해결책을 제공하고자 한다(UNESCO, 2023).

1970 년대부터 시작된 BR 은 초기에는 생태계의 보전에 강조점을 두고 다음의 세 가지 목표를 제시하였다: (1) 생태계 내의 생물 군집의 다양성(diversity)과 온전성(integrity)을 보전하고, (2) 생태 및 환경 연구를 위한 지역을 제공하며, (3) 교육과 훈련을 위한 시설을 제공한다(UNESCO, 1974, 1983). BR 은 이후 1996 년부터 보전 뿐만 아니라 지속가능한 이용도 고려하는 개념으로 확장되어, 그 기능과 구역이 (1) 생물다양성과 문화다양성을 보전하는 핵심구역(core zone), (2) 교육·모니터링·연구를 통해 보전과 발전을 지원하는 완충구역(buffer zone), 그리고 (3) 생태-사회적으로 지속가능한 지역 주민들의 경제 발전을 추구하는 전이구역(transition zone)으로 구체화되었다(Reed & Massie, 2013; UNESCO, 1996, 2023)(Fig. 1). BR 로 등재되기 위해서는 생물지리학적 지역을 대표할 수 있어야 하고, 생물다양성 보전을 위한 중요성을 가지며, BR 의 기능을 수행할 수 있을 정도의 충분한 크기, 구역 및 거버넌스를 가져야한다(UNESCO, 1996).

시대에 따라 강조점이 달라졌지만, BR 에서의 궁극적인 도전 과제는 생태계 온전성(ecosystem integrity)을 저하시키지 않으면서 생태계 서비스의 지속가능한 이용과 생물다양성의 보전을 조화시키는 것이다(Clüsener-Godt, 2020; Reed & Massie, 2013; UNESCO, 2000, 2002, 2023). 따라서 생태계 온전성의

1

정량적인 평가와 지속적인 모니터링이 필요하나, 온전성의 정의의 모호함과 계량의 기반이 되는 이론적 프레임워크 및 체계적인 장기 관측 자료의 부재가 걸림돌이 되고 있다(Bridgewater *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2007; Cho *et al.*, 2012). 이에 본 연구에서는 문헌조사를 기반으로 생태계 온전성을 재정의하고, 이론적 프레임워크를 기반으로 정량적인 평가 도구를 선정하여, 실제로 관측된 자료를 적용함으로써 생태계 온전성과 그 변화를 평가하고자 하였다.



Figure 1. Three zones and functions of the UNESCO Biosphere Reserve (UNESCO, 2023)

1.2. 생태계 온전성의 정의

생태계 온전성의 정의를 살펴보기에 앞서, '생태계'와 '온전성'을 각각 정의할 필요가 있다. 생태계(ecosystem)는 그리스어로 '가족, 가구(household)'를 뜻하는 'oikos'와 '시스템(system)'을 뜻하는 'sustéma(sun- 'with'+histanai 'set up')'의 합성어이다. 생태계라는 개념을 처음 제시한 Tansley (1935)는 생태계를 '특정 지역에서 생명체 및 그들과 연관된 물리적 환경의 복잡성'이라고 정의하였다. Chapin et al. (2011)은 생태계를 '서로 상호작용하는 생물과 비생물로 구성된 시스템'으로 정의하였다. Bland et al. (2018)은 생태계를 '생물 군집, 비생물학적 환경, 그들 사이의 상호작용 및 물리적인 공간으로 구성된 시스템'으로 정의하였다. 선행연구들은 공통적으로 생태계를 생물과 비생물, 그리고 이들 간의 상호작용을 갖는 시스템으로 간주하였다.

한편 온전성(integrity)은 '전체의, 완전한, 손상되지 않은'과 같은 뜻을 가진 라틴어 '*integer*'에서 파생된 단어이다(Lewis, 1891). 온전성은 다양한 맥락에서 쓰이지만, 유네스코는 온전성을 '자연/문화유산의 총체성(wholeness)과 그대로임(intactness)'으로 정의하고, 이를 평가하기 위해 유산의 중요한 가치를 나타내는데 필수 요소를 포함하는지, 유산의 중요성을 전할 만 한 적절한 크기인지, 개발 또는 방치의 부작용으로 고통받는지를 점검해야 한다고 제시하였다(WHC, 2019). 여기서 총체성(wholeness)은 'entire, whole'을 의미하는 '*hal*'과 'state'를 의미하는 '*nes(s)*'의 합성어로서, 시스템을 구성하고 있는 요소들을 전부 포함할 뿐만 아니라 그들의 합 이상(e.g., 구성 요소들의 상호작용으로 만들어지는 시스템 전체 차원의 행동)도 강조한다(Imada, 2008). 그대로임(intactness)은 'untouched, uninjured'를 의미하는 '*intactus*'와 'state'를 의미하는 '*nes(s)*'의 합성어로서, 생태계 맥락에서는 사람에 의해 영향을 받지 않은 상태를 강조한다(Eigenbrod *et al.*, 2015; Plumptre *et al.*, 2021).

생태계 온전성의 정의는 지난 40 여년간 학계에서 다양하게 제시되어 왔다. SCOPUS 에서 'ecosystem integrity, definition' 또는 'ecological integrity, definition' 이라는 키워드를 통해 검색된 문헌은 총 293 개였고, 이 중에서 생태계 온전성에 대한 분명한 정의를 제시한 문헌은 32 개였다(Table 1). 본 연구에서는 'ecosystem integrity'와 'ecological integrity'를 같은 개념으로 간주하고, 둘 다 생태계 온전성으로 해석하였다. 생태계 온전성의 정의를 분류하는 방법은 여러 가지가 있지만(Manuel-Navarrete *et al.*, 2004; Roche & Campagne, 2017; Rohwer & Marris, 2021; Schallenberg *et al.*, 2011; Westra *et al.*, 2000), 가장 본질적인 분류 방법을 따라 (1) 기준상태(reference state)의 관점과 (2) 열역학적(thermodynamic) 관점의 두 축으로 요약할 수 있다(Table 2). 전자는 생태계가 사람의 영향을 받지 않은 기준상태를 강조하고 후자는 생태계가 스스로 조직화 할 수 있는 역량을 강조한다. Table 2 에서 두 관점을 모두 포함하면 '둘 다'로, 어느 것에도 해당되지 않는 경우는 '그 외'로 분류하였다.

기준상태 관점에서는 생태계의 상태가 '사람의 영향을 받지 않은 야생의 상태' 혹은 '자연적인 변동 안에 있는 상태'인 기준상태와 비교하여 다르지 않게 보전됨을 온전성으로 정의한다(Table 2). 따라서 유네스코의 온전성의 정의에 '그대로임(intactness)'과 같은 맥락으로 볼 수 있다. 이 관점은 사람의 영향을 받지 않았거나 최소한으로 받은 기준상태와 비교해서 유사할수록 생태계 온전성이 높다고 평가한다. 예를 들어, 수상생태계의 온전성은 군집 수준의 종풍부도, 종구성, 기능군, 번식행동 등이 기준상태와 얼마나 비슷한지를 점수화해서 생물학적 온전성 지수(index of biological integrity)로 나타낸다(Karr & Dudley, 1981; Ruaro & Gubiani, 2013). 육상생태계에서는 구조(e.g., 천이후기종 비율, 고사목 부피, 그루터기 수, 수고, 야생생물 개체군 크기, 서식지 면적 등), 구성(e.g., 지표종, 침입종, 풍부도 등), 기능(e.g., 사망률, 토양 산도, 질소 포화, 조류 출현 빈도, 순일차생산량 등)을 기준상태의 그것들과 비교해 점수화하여 온전성을 평가한다(ECCC, 2021; Hill et al., 2022; Rempel et al., 2016; Tierney et al., 2009). 또한 사람에 의한 변이(human modification)를 정량화하여 이 값이 기준상태의 그것보다 높을 경우 생태계 온전성이 저해되었다고 한다(Theobald, 2013). 이처럼 기준상태 관점에서의 온전성의 정의는 다양한 생태계에 적용되었으나, 생태계의

기준상태를 정해야 하는 모호함과 다양한 시공간 규모의 많은 상태변수들을 통합해야 하는 실질적인 어려움을 안고 있다. 또한 기준상태와 비교하기 위해 선정된 상태변수들이 연구자의 주관에 따라 크게 상이하며, 상태변수 선정의 이론적 근거도 부족하다(Ruaro & Gubiani, 2013; Schallenberg *et al.*, 2011).

열역학적 관점에서는 생태계 온전성을 생태계가 자기-조직화(selforganization) 역량을 갖춘 상태로 정의한다(Table 2). 여기서 자기-조직화란 시스템을 구성하고 있는 요소들 간의 상호작용을 통해 시스템 전체의 질서를 만들기 위해 집단 행동을 조직화 함으로써(Halley & Winkler, 2008; Kutsch et al., 2001; Mitchell, 2009), 시스템 내부의 엔트로피 축적을 최소화 하는 과정이다(Baumann, 2001; Chang, 2022; Ebeling & Schweitzer, 2002; Schneider & Kay, 1994b). 생태계를 구성하고 있는 요소들은 크게 기능과 구조로 나눠질 수 있는데, 여기서 기능은 생태계의 생지화학물리적인 과정을 뜻하며 생산, 분해, 그리고 물질 및 에너지 순환 등을 포함한다(Jax, 2005; Müller & Windhorst, 2000; Naeem et al., 2004; Odum, 1962; Schowalter, 2011). 구조는 생태계의 생물 및 비생물 구성성분들이 연결된 방식으로 정의되며 종 구성, 환경요인의 분배/경도, 하부계 간의 네트워크 등으로 표현될 수 있다(Golley, 2000; Myster, 2001; Odum, 1962; Schowalter, 2011). 즉, 열역학적 관점에서는 생태계의 기능과 구조에 관련된 구성 요소들이 서로 상호작용하여 시스템 전체 차원에서의 질서를 만드는 자기-조직화 역량이 나타나 생태계가 온전하다고 본다. 따라서 유네스코의 온전성의 정의 중에 '총체성(wholeness)'과 같은 맥락으로 볼 수 있다. 이러한 관점에서 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들로 온전성을 평가하려는 시도가 있었다(Burkhard & Müller, 2008; Kutsch et al., 2001; Müller et al., 2000)(Appendix 1). 그러나 시스템의 총체적인 자기-조직화를 직접 평가하려는 시도는 찾아보기 힘든데, 실제 관측된 자료를 기반으로 열역학 엔트로피(thermodynamic entropy)를 정량화해야 하는 어려움이 있기 때문이다(Schallenberg et al., 2011; Ulanowicz, 2000).

5

유네스코가 요구하는 온전성은 기준상태 관점과 열역학적 관점을 모두 필요로 하기 때문에, 본 연구에서는 두 관점을 함께 고려하여 생태계 온전성을 '생태계의 자기-조직화 역량이 기준상태의 그것과 유의하게 다르지 않은 상태'로 정의하였다.

| Perspective | Definition | Reference | | | |
|-----------------------------------|--|--|--|--|--|
| Reference state perspective | "The capability of supporting and maintaining a balanced, integrated, adaptive community of organisms having a species composition, diversity, and functional organization comparable to that of natural habitat of the region." | Karr and Dudley (1981); Karr (1996) | | | |
| | "The condition of an ecosystem where the structure and function of the ecosystem are unimpaired by stresses induced by human activity and the ecosystem's biological diversity and supporting processes are likely to persist." | Woodley (1993) | | | |
| | "The state of being whole, entire or undiminished, a sound unimpaired or perfect condition." | Miller and Rees (2000) | | | |
| | "A minimal deviation from a natural reference condition." | Bunn and Davies (2000) | | | |
| | "An intact reference condition that is unaffected or only minimally affected by anthropogenic impacts and corresponds to a type-specific set of abiotic criteria." | Jungwirth <i>et al.</i> (2002) | | | |
| | "The ability of an ecological system to support and maintain a community of organisms that has species composition, diversity, and functional organization comparable to those of natural habitats within a region." | Parrish <i>et al.</i> (2003) | | | |
| | "The composition, structure, and function of an ecosystem in relation to the system's natural or historical range of variation, as well as perturbations caused by natural or anthropogenic agents of change." | Tierney <i>et al.</i> (2009) | | | |
| | "The degree to which the physical, chemical and biological components (including composition, structure and process) of an ecosystem and their relationships are present, functioning and maintained closed to a reference condition reflecting negligible or minimal anthropogenic impacts." | Schallenberg <i>et al.</i> (2011) | | | |
| | "A system with natural evolutionary and ecological processes, and minimal or no influence from human activities." | Theobald (2013) | | | |
| | "The structure, composition, function, and connectivity of an ecosystem as compared to reference ecosystems operating within the bounds of natural or historical disturbance regimes." | Faber- Langendoen <i>et al.</i> (2019) | | | |
| | A state "that its dominant ecological characteristics (e.g., elements of composition, structure and function, including ecological processes) occur within their natural ranges of variation and can withstand and recover from most perturbations imposed by natural environmental dynamics or human disruptions." | WCS (2020) | | | |
| | "When their (ecosystems') native components, such as native Species and biological communities, natural landscapes and functions, are intact and are likely to persist." | | | | |
| | "A measure of ecosystem structure, function and composition relative to the reference state of these components being | Hansen <i>et al.</i> (2021) | | | |

 Table 1. Definitions of ecosystem integrity suggested by previous studies

| | predominantly determined by the extant climatic-geophysical environment." | | | | | |
|-----------------------------------|---|--|--|--|--|--|
| Thermody- namic perspective | An ability "to maintain its organization (i.e., changes in the function of a system and its structure) in the face of changing environmental conditions." | Kay (1991), Kay and Schneider (1992) | | | | |
| | An ability "to sustain an organizing, self-correcting capability to recover toward an end-state that is normal and 'good' for that system, when subjected to disturbance." | Regier (1993) | | | | |
| | About "three facets of the self-organization of ecological systems: current well-being, resiliency, and the capacity to develop, regenerate, and evolve." | Kay and Regier (2000) | | | | |
| | An ecosystem has integrity "if it is able to maintain its organization and steady state after small disturbances and if it has a sufficient adaptability to continue the self-organized development." | Müller <i>et al.</i> (2000); Müller (2005) | | | | |
| | Related to "vigor, organization and resilience". | Ulanowicz (2000) | | | | |
| | A state "not to keep things as they are, or to constrain Wiersen ecosystems within historical bounds, but rather to retain the capability of the ecosystem to adapt." | | | | | |
| | "The ability of an ecosystem to maintain its self-organization capacity, stability, and diversity in structure and function." | Shi et al. (2018) | | | | |
| | Ecosystem integrity "arises from processes of self-organization derived from thermodynamic mechanisms that operate through the locally existing biota, as well as the energy and materials at their disposition, until attaining 'optimal' operational points which are not fixed, but rather vary according to variations in the physical conditions or changes produced in the biota or the environment." | Equihua <i>et al.</i> (2020) | | | | |
| | A system "attribute that reflects the degree to which an ecosystem is self-organized in a functional ecosystem state." | Zelnik <i>et al.</i> (2021) | | | | |
| Both | "The guarantee that those processes at the basis of ecosystem self-organizing capacity are protected and kept intact." | Nunneri <i>et al.</i> (2007) | | | | |
| | "The ability of an area to support native biodiversity and the ecosystem processes necessary to sustain that biodiversity over the long time." | McGarigal <i>et al.</i> (2018) | | | | |
| | "A measure of the wholeness and intactness of the natural and/or cultural heritage and its attributes." | WHC (2019) | | | | |
| | "The system's capacity to maintain composition, structure, autonomous functioning and self-organization over time using processes and elements characteristic for its ecoregion and within a natural range of variability." | Keith <i>et al.</i> (2020) | | | | |

| Others | "The maintenance of the community structure and function characteristic of a particular locale or deemed satisfactory to society." | Cairns (1977), De Leo and Levin (1997) | | |
|--------|--|--|--|--|
| | "The system's capacity to maintain structure and ecosystem functions using processes and elements characteristic for its ecoregion." | Dorren <i>et al.</i> (2004) | | |

| Perspective | Reference state perspective | Thermodynamic perspective |
|---|--|---|
| Definition of ecosystem integrity | The preservation of the state of the ecosystem as compared to the reference state that is unaffected by human or within natural fluctuations | The state in which the ecosystem has the self-organization capacity |
| Assessment method | Ecosystem has integrity when it's state variables are similar to those of reference state. | Ecosystem has integrity when it has self-organization capacity. |
| Example | Index of Biological Integrity (e.g., Karr, 1981), Diverse sets of state variables to evaluate ecosystem integrity (e.g., Tierney <i>et al.</i> , 2009; Rempel <i>et al.</i> , 2016), Human footprint (e.g., Theobald, 2013) | A set of state variables representing function and structure of an ecosystem proposed to be related to the self-organization (e.g., Müller <i>et</i> <i>al.</i> , 2000; Kutsch, 2001), Ascendency (e.g., Ulanowicz, 2000), Thermodynamic entropy balance |

Table 2. Definition, assessment method, and example of ecosystem integrity from reference state perspective and thermodynamic perspective

1.3. 이론적 프레임워크

본 연구에서 재정의한 생태계 온전성을 평가하려면 생태계의 자기-조직화를 정량화해야 하는데, 비평형 열역학(non-equilibrium thermodynamics)이 이를 위한 이론적 프레임워크를 제공한다. 열역학적 관점으로 보면, 생태계는 열려 있어서 시스템 내부와 외부 사이에 물질 및 에너지의 경도가 발생하여 비평형 상태(nonequilibrium state)에 놓여있다(Jørgensen *et al.*, 2000; Prigogine, 1976; Schneider & Kay, 1994b; Schrödinger, 1944). 시스템이 고립되어 있는 경우에는 외부 환경과 물질이나 에너지를 교환하지 않는다. 이러한 경우, 열역학 제 1 법칙에 따라 에너지 총량은 보존되며, 제 2 법칙에 따라 열역학 엔트로피는 시간에 따라 증가하게 된다. 즉, 고립계(isolated system)에서는 시스템 내부에 열역학 엔트로피가 계속 축적되고, 결국 물질 및 에너지의 경도가 0 이 되는 평형 상태(i.e., 열적 죽음)에 이르게 된다.

고립되지 않은 생태계는 외부 환경과 에너지만 교환하는 닫힌계(closed system)와 에너지와 물질을 모두 교환하는 열린계(open system)로 나뉘며, 둘 다 내부와 외부 간의 경도를 유지하는 비평형 상태이다(Schneider & Kay, 1994a; Schneider & Kay, 1994b)(Fig. 2). 생태계는 태양으로부터 유입된 에너지를 포획하고 다양한 경로로 소산시키는 과정에서, 쓸모 없는 에너지의 형태로 변환된 열역학 엔트로피를 생성한다. 한편 생성된 열역학 엔트로피를 시스템 내부에 축적만 하면 내부 자원이 고갈된 후에는 죽게 되므로, 생명을 유지하기 위해 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피를 시스템 밖으로 수송한다(Fath *et al.*, 2004; Nielsen *et al.*, 2020). 외부로의 수송을 통해 시스템 내부의 열역학 엔트로피 축적을 최소화 하는 과정을 자기-조직화라고 정의하면(Baumann, 2001; Chang, 2022; Ebeling & Schweitzer, 2002; Schneider & Kay, 1994b), 생태계의 자기-조직화 역량은 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피(entropy production, σ)와 외부로 수송된 열역학 엔트로피(entropy transfer, *J*)의 비율, 즉 |*J*/σ|로 나타낼 수 있다.



Figure 2. Alive ecosystem maintains energy gradient while minimizing the internal entropy accumulation via self-organization

1.4. 연구 질문

본 연구는 재정의된 생태계 온전성을 평가할 연구 대상지로서 유네스코 BR 의 하나인 광릉숲 BR에 위치한 한국 광릉 낙엽활엽수 노령림(Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea, GDK)을 선택하였다. 광릉숲은 다양한 이유로 유네스코 BR 로 등재되었는데(Appendix 2), 그 중 핵심구역 내에 위치하는 GDK 는 한국의 타워 기반의 플럭스 모니터링 네트워크(KoFlux)의 주요 관측지다. 2005 년부터 열역학 엔트로피 계산에 필요한 복사 및 지표 에너지 수지와 기온을 포함한 다양한 생물기상 변수들이 현재까지 체계적으로 관측되고 있다. 본 연구에서는 GDK 가 BR 로 지정된 2010 년을 기준으로 그 이전 5 년(2006-2010 년)을 기준상태로 가정하여 자기-조직화를 정량화하고 그 특징을 파악하는 기간으로 사용하였다. 그 이후 10 년(2011-2020 년)을 5 년씩 연속된 두 개의 시험 기간으로 정하고 각 기간의 자기-조직화를 정량화하여 기준상태의 그것과 비교함으로써, 'GDK 에서 생태계 온전성이 유지되고 있는가?'라는 질문에 답하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

연구 대상지인 GDK 는 대한민국 경기도 포천시 소흘읍 소재의 국립수목원에 위치해 있다(37°75'N, 127°15'E). GDK 는 조선시대 세조 때부터 왕실의 숲으로 지정되어 550 여년 동안 엄격하게 보존되어 왔으므로(Kim et al., 2006), 전형적인 노령림(old-growth forest)의 특성을 보인다(Fig. 3). 여기서 노령림이란 (1) 구조적으로는 수목의 나이가 다양하고 오래된 나무가 존재하며(온대 낙엽활엽수림의 경우 ~200 년 이상), 대형 고사목이 발견되고 복잡한 수평 및 수직적 구조를 가지며, (2) 천이 후기의 종이 출현하며, (3) 기능적으로는 생물량의 축적이 둔화되고 양분 순환이 닫히는 등의 특성이 나타난다(Park & Oliver, 2015; Wells et al., 1998; Wirth et al., 2009).

GDK 의구조를 살펴보면, 상층에는 임령 200 년 이상의 졸참나무(Quercus serrata)와 서어나무(Carpinus laxiflora)가 우점하고, 하층에는 까치박달(Carpinus cordata)과 당단풍나무(Acer pseudosieboldianum)가 우점한다(Cho et al., 2021; KNA, 2020b; Song & Ryu, 2015). 이 중 까치박달과 당단풍나무는 한반도의 대표적인 천이 후기종으로 알려져 있다(Choung et al., 2020; Lee, 2011a). 또한 유묘부터 흉고직경이 500 mm 이상인 대경목 및 대형고사목들도 존재해 수목의 나이가 다양하게 분포하고 있다(Cho et al., 2020). GDK 의 기능을 살펴보면, 지난 60 년간 생물량 축적 속도가 점차 둔화되고 있었으며(NIFos, 2016), 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)의 순 생태계 교환량이 흡원에서 중립에 가깝게 유지되다가 최근 발원으로 전환되면서 노령림의 특성을 드러내고 있다(Yang et al., 2021).

14



Figure 3. Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) panoramic view, (b) an old *Quercus serrata* with 500 mm in diameter at breast height, (c) large dead trees, (d) forest gap caused by dead trees, (e) dominant species – Q. serrata, (f) dominant species – *Carpinus laxiflora*

GDK는장기생태연구사업의 연구대상지로 지정되어 1990년대 후반부터 임분 동태, 물 순환, 생물다양성 등이 모니터링 되고 있으며(Park et al., 2018), GDK 플럭스 타워에서 에디-공분산(eddy-covariance) 기반의 플럭스 관측이 현재까지 체계적으로 진행되고 있다(Kang et al., 2019)(Fig. 4). GDK 플럭스 타워는 유역 내의 10-20° 경사를 가진 지형에 위치한다(Kang et al., 2017; Lim et al., 2003). GDK 플럭스 타워에서 관측되는 플럭스의 발자국(flux footprint) 영역이 관측 시스템의 경계가 된다(Fig. 5). 1998 년에 플럭스 발자국 안에서 수행된 과거의 식생 조사에 따르면 흉고직경이 20 mm 이상인 입목 밀도는 1,473 trees ha⁻¹ 이고, 흉고단면적합은 28 m² ha⁻¹ 이었다(Lim et al., 2003). 2006 년부터 2020 년까지 플럭스 발자국 안에서 수행된 최근의 식생 조사에서는 입목 밀도가 1,717 trees ha 1이고, 흉고단면적합은 31 m² ha⁻¹ 이었다(Table 3). 방형구가 동일하지 않아서 직접적인 비교는 어렵지만 20 년 전과 동일하게 졸참나무-서어나무가 우점하고 있었다. 수고 16m 이상 상층에는 졸참나무가 주로 분포하고, 8m 부터 16m 까지는 서어나무가 우점하며, 8 m 이내의 하층에는 까치발달과 때죽나무(Styrax japonicus)가 주로 분포한다. 엽면적지수의 계절적 변동은 주로 졸참나무와 서어나무에 의해 결정되었다(Song & Ryu, 2015). 토양 깊이는 0.4-0.8 m 이며, 토성은 사양토이다(Kwon, 2009).



Figure 4. GDK fluxtower and forest flow monitoring facility: (a) GDK fluxtower, (b) monitoring equipment installed in the fluxtower, (c) and (d) forest flow monitoring facility required for water cycle assessment



Figure 5. An eddy-covariance fluxtower and vegetation permanent plots installed in the GDK watershed: A red arrow indicates the location of the GDK fluxtower, and white numbers indicate the location of four vegetation permanent plots. The black contour line represents the contribution of the flux footprint.

| Species | Basal area (m ² ha ⁻¹ yr ⁻¹) | | Mean diameter at breast height (mm species ⁻¹ yr ⁻¹) | | Density (trees ha ⁻¹ yr ⁻¹) | |
|---|---|------|---|-----|---|-----|
| | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD |
| Quercus serrata (졸참나무) | 18.3 | 10.1 | 394 | 93 | 149 | 67 |
| <i>Carpinus laxiflora</i> (서어나무) | 5.1 | 2.8 | 139 | 99 | 514 | 711 |
| Quercus mongolica (신갈나무) | 2.7 | 5.4 | 47 | 93 | 97 | 195 |
| <i>Carpinus cordata</i> (까치박달) | 2.3 | 2.0 | 97 | 69 | 140 | 97 |
| <i>Cornus kousa</i> (산딸나무) | 0.5 | 0.2 | 60 | 18 | 152 | 36 |
| Acer pictum subsp. Mono (고로쇠나무) | 0.5 | 1.0 | 61 | 122 | 8 | 17 |
| <i>Quercus variabilis</i> (굴참나무) | 0.4 | 0.8 | 74 | 148 | 7 | 13 |
| <i>Sorbus alnifolia</i> (팥배나무) | 0.3 | 0.3 | 64 | 48 | 139 | 179 |
| <i>Acer pseudosieboldianum</i> (당단풍나무) | 0.3 | 0.1 | 42 | 11 | 188 | 76 |
| <i>Styrax obassia</i> (쪽동백나무) | 0.2 | 0.1 | 58 | 18 | 83 | 75 |
| Other species (18 species) | 0.6 | | | | 240 | |
| Sum | 31.3 | | | | 1,717 | |

Table 3. The basal area at breast height, mean diameter at breast height, and tree density at vegetation permanent plots from 2006 to 2020

2.2. 생물기상 관측

2.2.1. 이론적 배경

2.2.1.1. 에디-공분산 관측

임관 내부 및 위의 대기는 에너지와 물질을 위아래로 나르는 난류를 포함한다. 에디-공분산 기술은 고속(>10Hz)으로 반응하는 기기들을 사용하여 연직 난류 수송을 직접 관측하고, 임관과 대기 사이에서 교환되는 에너지와 물질의 순 플럭스를 정량화하는 방법이다(Kang *et al.*, 2014). 예를 들어, 운동량, 수증기, 이산화탄소, 메탄 등의 단위 시간당 단위 면적을 통과한 물리량을 측정할 수 있다. 관측 대상지역이 수평적으로 평평하고 균질하다는 가정 하에, 임의의 기체 플럭스에 레이놀즈 평균을 적용하면 연직 플럭스는 식 1 과 같다(Choi *et al.*, 1999):

$$F (= \overline{wc\rho_a}) = \overline{\rho_a}\overline{w}\overline{c} + \overline{\rho_a}\overline{w'c'} \qquad (4)$$

여기서 F는 기체 플럭스, ρ_a는 공기 밀도, w는 연직 풍속, c는 혼합비(c = ρ_c/ρ_a), ρ_c 는 기체 밀도, ⁻ 는 시간 평균, '는 평균으로부터의 변동을 나타낸다. 양의 공분산은 플럭스가 지표에서 대기로 흐름을 뜻하고, 음의 공분산은 플럭스가 대기에서 지표로 흐름을 뜻한다. 지표면이 기울어져 있지 않거나 좌표 변환을 통해 ₩ ≈ 0로 만들면 식 1 은 식 2 로 표현될 수 있다. 즉, 플럭스는 난류에 의한 평균 연직 공분산으로 나타낼 수 있다(Choi *et al.*, 1999).

$$F = \overline{\rho_a} \overline{w'c'} \tag{4.2}$$

2.2.1.2. 복사 및 에너지 수지

생태계의 에너지 수지를 이해하기 위해 먼저 복사 수지를 이해할 필요가 있다. GDK 는 주변 환경과 물질 및 에너지를 교환하는 열린 시스템이며, 이 시스템에서의 복사 수지는 다음과 같이 표현된다:

$$R_n = R_{s\downarrow} + R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} + R_{l\uparrow} \qquad (4 3)$$

여기서 R_n 은 순복사(net radiation), $R_{s\downarrow}$ 는 하향단파복사(incoming shortwave radiation), $R_{s\uparrow}$ 는 상향단파복사(outgoing shortwave radiation), $R_{l\downarrow}$ 은 하향장파복사(incoming longwave radiation), $R_{l\uparrow}$ 은 상향장파복사(outgoing longwave radiation), $R_{l\uparrow}$ 은 상향장파복사(outgoing longwave radiation)이며, 단위는 모두 W m⁻² 이다. 시스템 안으로 들어오는 플럭스의 기호는 양수이며, 밖으로 빠져나가면 음수이다.

에너지 수지는 다음과 같이 표현된다(e.g., Kang et al., 2009):

$$R_n = LE + H + G + S + M \tag{44}$$

여기서 *LE*는 잠열 플럭스(latent heat flux), *H*는 현열 플럭스(sensible heat flux), *G*는 지중열 플럭스(ground heat flux)이다. *S*는 열저류항(heat storage)으로서, 산림의 경우 목본의 생물량에 저장되는 열(biomass heat storage, *B*)이 가장 주된 열저류항이다(*S* ≈ *B*). *M*은 광합성 및 호흡과 관련된 신진대사 열저류항(metabolic heat storage)이다. 단위는 모두 W m⁻² 이다. GDK 의 경우 플럭스 타워 주변의 수목이 우거졌기 때문에 *G*와 *B*를 에너지 수지에 포함시켰으며, 두 항을 구하기 위한 추가적인 계산은 Appendix 3 과 4 에서 찾아볼 수 있다. 한편 *M*은 일적산 이상의 시간 규모에서 고려했을 때 무시할 만큼 작다고 가정하였다(Holdaway *et al.*, 2010).

에너지 수지 닫힘은 에너지 수지 비율(Energy Balance Ratio, *EBR*)로 평가할 수 있다(Wilson *et al.*, 2002)(식 5). 여기서 *R_n*, *LE*, *H*, *G*, *B*는 연단위로 적산한 값이다.

$$EBR = \frac{LE + H}{R_n - G - B} \tag{(15)}$$

2.2.1.3. 열역학 엔트로피 수지

시스템의 열역학 엔트로피(S)의 변화는 식 6 과 같다:

$$\Delta S = \int dQ/T \qquad (\stackrel{\text{(A)}}{\to} 6)$$

여기서 *T*는 시스템의 온도이고 *dQ*는 시스템 내부의 에너지 변화이다. 열린 시스템인 생태계에서 외부 환경으로부터 시스템 내부로 들어오는 열역학 엔트로피 플럭스를 Δ*S_e* 라고 하자. 비가역적인 과정에서는 Δ*S*와 Δ*S_e*의 차이가 시스템 내부에서 생성된 열역학 엔트로피(Δ*S_i*)이며, 열역학 제 2 법칙에 의해 Δ*S_i*는 항상 0 보다 크거나 같다(e.g., Endres, 2017).

$$\Delta S - \Delta S_e = \Delta S_i \ge 0 \tag{47}$$

식 7 을 Δ*t* 로 나눠주면, 시간에 따른 열역학 엔트로피 수지의 변화는 다음과 같이 표현된다(e.g., Brunsell *et al.*, 2011):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt} = \sigma + J \tag{(18)}$$

여기서 *dS_i/dt* (= σ)는 시스템 내부에서 생성되는 열역학 엔트로피이며 음수가 될 수 없다. *dS_e/dt* (= *J*)는 시스템 외부와 내부 사이를 오가는 열역학 엔트로피의 수송으로 양수나 음수가 될 수 있다. 이 항들은 온도 *T*에서의 열의 흐름이나 물질의 흐름에 의해 결정된다. *J*가 음수라면 열역학 엔트로피가 시스템 내부에서 외부로 수송되며, 양수라면 그 반대이다. 열역학 엔트로피 생성(σ)과 수송(*J*)을 합하면 시스템 내부에서 열역학 엔트로피의 순 생태계 교환량(net ecosystem exchange of thermodynamic entropy, *dS/dt*)이 된다. 이 값이 클수록 열역학 엔트로피가 시스템 밖으로 수송되지 않고 내부에 축적됨을 의미한다(Eulenstein *et al.*, 2003; Steinborn & Svirezhev, 2000). 단위는 모두 W m⁻² K⁻¹ 이다.

σ는 두 개의 열역학 엔트로피 생성항으로 구성된다(e.g., Brunsell *et al.*,
 2011; Yang *et al.*, 2020):

$$\sigma = \sigma_{Rsn} + \sigma_{Rl\downarrow} \tag{49}$$

여기서 σ_{Rsn} 은 순단파복사(i.e., $R_{sn} = R_{s\downarrow} + R_{s\uparrow}$)가 소산되는 과정에서 생성되는 엔트로피다. $\sigma_{Rl\downarrow}$ 은 하향장파복사($R_{l\downarrow}$)의 소산으로 인해 생성되는 엔트로피다.

σ_{Rsn}은 다음과 같이 계산된다:

$$\sigma_{Rsn} = R_{sn} \left(\frac{1}{T_{surf}} - \frac{1}{T_{sun}} \right) \tag{(110)}$$

여기서 *T_{sun}*은 태양 온도이며 상수(=5,780 K)로 간주되었다. *T_{surf}*는 식 11 의 스테판-볼츠만 식으로 계산된 지표 온도이다. 단위는 모두 K 이다:

$$T_{surf} = \left[\frac{R_{l\uparrow} - (1 - \varepsilon) \cdot R_{l\downarrow}}{\varsigma \cdot \varepsilon}\right]^{\frac{1}{4}}$$
 (Å] 11)

이 때 ς는 스테판-볼츠만 상수(5.67×10⁻⁸ W m⁻² K⁻¹)이며, ε는 지표 3–14 μm 밴드로 구한 식물의 방사율로서 낙엽활엽수림에 해당되는 값인 0.99 를 사용하였다(Peres & DaCamara, 2005).

σ_{RII}은 다음과 같이 계산된다:

$$\sigma_{Rl\downarrow} = R_{l\downarrow} \left(\frac{1}{T_{surf}} - \frac{1}{T_{atm}} \right) \tag{(112)}$$

여기서 *T_{atm}*은 스테판-볼츠만 식으로 계산된 대기 온도이며 단위는 K 이다(식 13). 이 때, *ε*는 대기의 방사율인 0.85 를 사용하였다(Campbell & Norman, 1998):

$$T_{atm} = \left[\frac{R_{ll}}{\varsigma \cdot \varepsilon}\right]^{\frac{1}{4}}$$
 (Å] 13)

J 는 생태계 내부의 다양한 경로를 통해 수송되는 열역학 엔트로피 수송항들로 구성된다(e.g., Brunsell *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2020):
$$J = J_{Rsn} + J_{Rl\downarrow} + J_{Rl\uparrow} + J_{LE} + J_H + J_G + J_B \qquad (\stackrel{\text{(A)}}{\to} 14)$$

여기서 *J_{Rsn}*, *J_{Rli}*, *J_{LE}*, *J_H*, *J_G*, *J_B*는 각각 *R_{sn}*, *R_{li}*, *LE*, *H*, *G*, *B*와 관련된 열역학 엔트로피 수송항이다. 각 항들은 다음과 같이 계산된다:

$$J_{Rsn} = \frac{R_{sn}}{T_{sun}} \tag{(4) 15}$$

$$J_{Rl\downarrow} = \frac{R_{l\downarrow}}{T_{atm}} \tag{(16)}$$

$$J_{Rl\uparrow} = \frac{R_{l\uparrow}}{T_{surf}} \tag{(4) 17}$$

$$J_{Rln} = J_{Rl\downarrow} + J_{Rl\uparrow} \tag{(4)18}$$

$$J_{LE} = J_{LE\hbar eat} + J_{LEmix} \qquad (4 19)$$

$$J_{LEheat} = \frac{LE}{T_{air}} \tag{(4) 20}$$

$$J_{LEmix} = (E)(R_V)\ln(RH_{amb}) \qquad (4 21)$$

$$J_H = \frac{H}{T_{air}} \tag{(4) 22}$$

$$J_G = \frac{G}{T_{soil}} \tag{(4) 23}$$

$$J_B = \frac{B}{T_{veg}} \tag{A} 24$$

시스템 안으로 들어오는 플럭스의 기호는 양수이며, 밖으로 빠져나가면 음수이다. 여기서 *T_{air}*은 에디-공분산 시스템의 높이인 지상으로부터 40 m 높이에서 관측된 기온이며 단위는 K 이다. *E*(kg m⁻² s⁻¹)는 증발, *R_V*는 수증기압 상수(습한 공기의 경우 461 J kg⁻¹ K⁻¹)이며, *RH_{amb}*는 상대 습도이다(Kleidon & Schymanski, 2008). *T_{soil}*은 지표로부터 0.1 m 깊이에서 측정된 토양 온도이다. *T_{veg}*은 식생 온도이며 식생이 주로 분포하는 지상 위 1, 3, 5, 15 m 의 기온의 평균을 사용하였다. 단위는 모두 K 이다.

2.2.2. 플럭스 및 환경 요인 관측

GDK 플럭스 타워의 지상 40 m 높이에 위치한 3 차원 초음파 풍향풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA)와 적외선 기체분석기로 구성된 에디-공분산 시스템으로 CO₂ 및 H₂O 플럭스를 관측하였다. 개회로 적외선 기체분석기(Model LI-7500, LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA)는 2004 년부터 2016 년 2 월까지 사용되었고, 봉폐회로 적외선 기체분석기(EC155, Campbell Scientific, Inc.)는 2015 년 7 월부터 현재까지 사용되고 있다(Kang *et al.*, 2019). 에디-공분산 시스템의 샘플링 속도는 10 Hz 이고 플럭스 평균시간은 30 분이며, 원자료 및 평균값은 모두 자료 집록기에 저장하였다(Models CR5000 or CR3000, Campbell Scientific, Inc.). 열저류항 계산에 필요한 여덟 높이에서의 CO₂ 및 H₂O 농도는 프로파일 시스템(Model AP200, Campbell Scientific, Inc.)을 통해 관측되었다(Yoo *et al.*, 2009).

환경 요인(i.e., 강수량(*PPT*), 복사($R_{s\downarrow}$, $R_{s\uparrow}$, $R_{l\downarrow}$, $R_{l\uparrow}$, R_n), 기온(T_{air}), 상대습도(*RH*), 토양수분함량(*SWC*), 포차(*VPD*))도 매초마다 측정하고 30 분 평균하여 자료 집록기(Models CR23X or CR3000, Campbell Scientific, Inc.)에 저장하였다. *PPT*는 플럭스 타워에서 북동쪽으로 2 km 떨어진 곳과 북서쪽으로 1 km 떨어진 두 곳에서 관측하였다. R_n 은 순복사계(Model CNR1, Kipp & Zonen B.V., Delft, the Netherlands)를 이용해 40 m 높이에서 측정하였다. T_{air} 와 *RH*는 온습도계(Models HMP45C or HMP155, Vaisala Oyj, Helsinki, Finland)를 이용해 40 m 높이에서 측정하였다. *SWC* 는 지표로부터 깊이 0.1–0.3 m 에서 시간영역반사측정기(time domain reflectometer, Models CS615 and CS616, Campbell Scientific Inc.)를 사용하여 측정하였다. *VPD*는 주간자료($R_{s\downarrow} > 20$ W m⁻)만 분석에 사용하였다. 자세한 정보는 Lee *et al.* (2007)와 Kang *et al.* (2009)에서 찾을 수 있다.

2.2.3. 관측 자료의 처리

저장된 에디-공분산 자료는 Eddypro (LI-COR, Inc., USA)와 MATLAB (The MathWorks, Inc., USA)을 기반으로 한 표준화된 KoFlux 자료처리 프로그램으로 처리되었다(Kang *et al.*, 2018). 이 과정은 추세 제거, 시간 지연 보상, 좌표 변환, 초음파풍속계 온도의 수증기 보정, 주파수 반응 보정, 난류 스펙트럼과 품질 관리 점검, 프로파일 관측자료를 이용한 저류항 계산, 튀는 자료 제거, 결측 자료 메우기, 야간 CO₂ 플럭스 자료의 보정과 배분을 포함한다. 품질 관리 후 CO₂ 플럭스, *PPT*, *R*_{s↓}, *T_{air}*, *SWC*, *VPD*의 연간 자료수득률은 원자료의 66.5±13.2%, 94.4±9.0%, 95.8±6.2%, 96.8±4.6%, 92.3±7.1%, 93.2±8.1% (평균± 표준편차)이었다.

관측 기간 도중인 2015 년 7 월부터 개회로 적외선 기체분석기가 봉폐회로 적외선 기체분석기로 교체되었기 때문에, CO₂ 플럭스 및 *LE* 자료의 연속성 확보를 위한 자료 교정을 수행하였다. CO₂ 의 경우, 개회로 적외선 기체분석기는 기기에서 발생하는 열이 CO₂ 밀도에 영향을 주어 추운 날씨일수록 CO₂ 플럭스가 흡원 쪽으로 편향되는 경향이 보고되었다(Burba *et al.*, 2008). GDK 플럭스 타워에서 기체분석기를 완전히 교체하기 전에 상호비교실험을 진행한 결과, 개회로 적외선 기체분석기에서 관측된 월적산 *NEE* 는 12 월의 경우 봉폐회로 적외선 기체분석기의 그것보다 -44 g C m⁻² 정도 CO₂ 흡원으로 편향되었다(Kang *et al.*, 2019). 관측자료의 연속성을 위해 상호비교실험 결과를 토대로 기온(*T_{air}*, ℃)과 풍속(*ws*, m s⁻¹)을 입력변수로 하는 경험적인 교정식(식 25)을 만들고, 평균 기온이 영하로 떨어질 때 이를 개회로 적외선 기체분석기로 관측한 자료에 적용하였다.

한편 LE의 경우, 봉폐회로 적외선 기체분석기에서 관측된 LE가 튜브 감쇄 효과로 인해 계절이나 대기안정도에 상관없이 과소평가됨을 확인하였다(Kang et al., 2019). 관측자료의 연속성을 위해 상호비교실험 결과를 토대로 경험적인 교정식(식 26)을 만들고, 이를 봉폐회로 적외선 기체분석기로 관측한 자료에 적용하였다.

교정된 LE = 교정 전의 LE × 1.09 (식 26)

2.3. 자기-조직화

생태계의 자기-조직화 과정은 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피(σ) 대비 시스템 외부로 수송된 열역학 엔트로피(J)의 크기의 비율로 표현할 수 있다(Eulenstein *et al.*, 2003; Jørgensen, 2002; Nielsen *et al.*, 2020; Steinborn & Svirezhev, 2000). 시스템 외부로 수송하는 경우 J의 부호는 음수이므로, 식 27 과 같이 계산한다. 연적산 σ와 J의 단위는 MJ m⁻² K⁻¹ 이며, J/σ 의 단위는 무차원이다.

2.4. 통계 분석

GDK 가 BR 로 지정된 2010 년을 기준으로 그 이전 5 년(2006-2010 년)을 기준상태로 가정하고, 그 이후 10 년(2011-2020 년)을 5 년씩 두 기간으로 나누어 시험 기간으로 정하였다. 각 기간의 환경 요인, 복사 수지, 에너지 수지, 열역학 엔트로피 수지, 그리고 자기-조직화를 정량화 하여 기준상태의 그것과 통계적으로 비교하였다. 단, 관측값들이 시계열 자기상관(time serial autocorrelation)을 가지므로 Newey-West 표준편차를 사용한 선형 회귀 분석을 수행하여 기준상태 기간과 시험 기간의 평균 차이를 분석하였다(Zeileis *et al.*, 2022). 유의 수준(significance level, *α*)은 자료마다 관측 및 공간대표성의 불확도를 고려하여 0.1 로 설정하였다(Appendix 5). 통계 분석은 R 프로그램(R Core Team, 2020)의 'sandwich'와 'Imtest' 라이브러리를 사용하였다.

3.결 과

3.1. 환경 요인

3.1.1. 기준상태 기간

연적산 및 연평균한 환경 요인을 Table 4 와 Fig. 6 에 요약하였다. 기준상태 기간(2006-2010 년) 동안 *PPT* 는 평균 1,478 ± 151 mm yr⁻¹ 으로 30 년 평년값(1,403±340 mm yr⁻¹)의 변동 범위 안에 들어간다. *R*_{s↓}는 4,648±173 MJ m⁻² yr⁻¹으로 30 년 평년값(4,425±342 MJ m⁻² yr⁻¹)의 변동 범위의 상한에 속한다. *T_{air}*은 11.3±0.4 ℃ yr⁻¹ 으로 30 년 평년값(10.0±0.6 ℃ yr⁻¹)보다 높았다. 그럼에도 불구하고 *PPT*, *R*_{s↓}, *T_{air}*은 기준상태 기간 동안 특별히 큰 변동을 보이지 않았으며, *SWC*와 *VPD* 역시 그러하였다. 참고로 GDK 플럭스 타워에서 관측한 *PPT*, *R*_{s↓}, *T_{air}*은 GDK 가 위치한 포천시에서 가까운 주변 기상관측소(i.e., 서울, 동두천, 양평)에서 관측된 값과 비교해서 그 크기나 경년 변동이 유사하였다(Appendix 6).

3.1.2. 시험 기간

첫번째 시험 기간(2011-2015 년)의 PPT와 T_{air}는 기준상태 기간의 최솟값과 최댓값을 벗어나는 폭 넓은 변동을 보였다. PPT는 2011 년에 기준상태 기간의 최댓값보다 높았으나 지속적으로 줄어들어 기준상태 기간의 최솟값보다 낮아졌다. 반면에 T_{air}는 기준상태 기간의 최솟값보다 낮아졌다가 증가하여 2015 년에 최댓값보다 높아졌다. R_{st}는 지속적으로 증가하여 대부분의 해가 기준상태 기간의 최댓값보다 높았던 반면(기준상태 기간보다 평균 6% 증가), SWC 와 VPD 는 기준상태 기간에 비해 각각 평균 15%, 14% 낮았다.

두번째 시험 기간(2016-2020 년)에도 PPT는 기준상태 기간의 최솟값보다 낮은 값을 유지하다가 2020 년에 최댓값보다 커지는 큰 변동을 보였다(기준상태

기간보다 평균 15% 감소). R_{sl} 는 더 증가하여 기준상태 기간의 평균보다 9% 증가하였다. T_{air} , SWC 및 VPD의 경우, 모두 기준상태 기간의 변동 범위 안에 속하였다.

Table 4. Annually integrated precipitation (*PPT*), incoming shortwave radiation ($R_{s\downarrow}$) and annually averaged air temperature (T_{air}), soil water content (*SWC*), and vapor pressure deficit (*VPD*) from 2006 to 2020 observed in the Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK). (SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| Voor | PPT | Rs_{\downarrow} | T_{air} | SWC | VPD |
|--------------|-------|--------------------|-----------|--------------------------------|-----|
| Tear | mm | MJ m ⁻² | Ĉ | m ³ m ⁻³ | hPa |
| 2006 | 1,604 | 4,675 | 11.5 | 0.24 | 6.3 |
| 2007 | 1,356 | 4,516 | 11.7 | 0.30 | 7.2 |
| 2008 | 1,423 | 4,826 | 11.4 | 0.28 | 7.5 |
| 2009 | 1,336 | 4,794 | 11.3 | 0.27 | 8.0 |
| 2010 | 1,671 | 4,427 | 10.7 | 0.26 | 7.0 |
| Mean | 1,478 | 4,648 | 11.3 | 0.27 | 7.2 |
| SD | 151 | 173 | 0.4 | 0.02 | 0.6 |
| 2011 | 2,272 | 4,672 | 10.4 | 0.23 | 5.9 |
| 2012 | 1,422 | 4,948 | 10.1 | 0.21 | 6.5 |
| 2013 | 1,277 | 4,847 | 10.6 | 0.26 | 5.1 |
| 2014 | 897 | 5,051 | 11.4 | 0.23 | 6.4 |
| 2015 | 875 | 5,133 | 11.9 | 0.23 | 7.0 |
| Mean | 1,348 | 4,930 | 10.9 | 0.23 | 6.2 |
| SD | 568 | 180 | 0.7 | 0.02 | 0.7 |
| Dif (%) | -9 | 6 | -4 | -15 | -14 |
| 2016 | 1,117 | 5,089 | 11.9 | 0.27 | 7.3 |
| 2017 | 1,180 | 5,188 | 10.9 | 0.26 | 6.9 |
| 2018 | 1,267 | 5,205 | 10.7 | 0.28 | 6.8 |
| 2019 | 937 | 5,046 | 11.3 | 0.27 | 7.2 |
| 2020 | 1,809 | 4,897 | 10.9 | 0.30 | 6.4 |
| Mean | 1,262 | 5,085 | 11.1 | 0.27 | 6.9 |
| SD | 329 | 125 | 0.5 | 0.01 | 0.3 |
| Dif (%) | -15 | 9 | -2 | 0 | -4 |
| Mean (15 yr) | 1,363 | 4,888 | 11.1 | 0.26 | 6.8 |
| SD (15 yr) | 372 | 240 | 0.5 | 0.03 | 0.7 |



Figure 6. Annually integrated or averaged environmental factors from 2006 to 2020 observed in the Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) precipitation (*PPT*), (b) incoming shortwave radiation ($R_{s\downarrow}$), (c) air temperature (T_{air}), (d) soil water content (*SWC*), and (e) vapor pressure deficit (*VPD*). (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.)

3.2. 복사 수지

3.2.1. 기준상태 기간

Table 5 와 Fig.7 에 연적산한 복사 수지를 요약하였다. 위 환경 요인에 제시한대로 $R_{s\downarrow}$ 는 평년값의 상한 범위인 4,648±173 MJ m⁻² yr⁻¹ 였고, 알베도 $(R_{s\uparrow}/R_{s\downarrow})$ 는 기준상태 기간 후반부에 감소하여 평균 0.094 였다. 복사 수지에서 가장 큰 부분을 차지하는 $R_{l\downarrow}$ 과 $R_{l\uparrow}$ 은 서로 상쇄되어, 그 둘의 합인 R_{ln} 은 $R_{s\downarrow}$ 의 39%인 $-1,833\pm103$ MJ m⁻² yr⁻¹ 였다. 그 결과, R_n 은 2,380±63 MJ m⁻² yr⁻¹ 로 에너지 포획 $(R_n/R_{s\downarrow})$ 은 51%였다. 복사 수지는 알베도를 제외하고는 기준상태 기간 동안 큰 변동을 보이지 않았다.

3.2.2. 시험 기간

첫번째 시험 기간 동안 $R_{s\downarrow}$ 는 지속적으로 증가하여 기준상태 기간보다 평균 6% 증가하였다. 알베도 역시 증가하였으나, $R_{s\downarrow}$ 와는 달리 기준상태 기간의 평균보다 3% 증가에 그쳤다. 그 결과, R_{sn} 은 기준상태 기간보다 평균 6% 증가하였다. 반면에 $R_{l\downarrow}$ 과 $R_{l\uparrow}$ 은 기준상태 기간과 유사한 변동 범위를 보여 R_{ln} 또한 기준상태 기간과 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 따라 R_n 은 기준상태 기간의 평균보다 8% 증가하였다.

두번째 시험 기간에는 R_{s1} 가 첫번째 시험 기간보다 더 증가하여 기준상태 기간보다 평균 9% 높았다. 이에 비해 R_{s1} 는 더 큰 폭으로 증가하여 알베도는 12% 증가하였다. 장파복사의 경우, R_{l1} 이 1% 증가하고, R_{l1} 의 크기가 1% 감소하였다. 비록 증감률은 작았지만, 두 장파복사의 크기가 상대적으로 매우 크기 때문에 둘의 합인 R_{ln} , 즉 GDK 에서 대기로 방출되는 순장파복사가 기준상태 기간의 평균보다 12%나 감소하였다. 그 결과, R_n 은 기준상태 기간의 평균보다 23%나 증가하였다.

Table 5. Annually integrated radiation balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): incoming shortwave radiation $(R_{s\downarrow})$, outgoing shortwave radiation $(R_{s\uparrow})$, net shortwave radiation (R_{sn}) , incoming longwave radiation $(R_{l\downarrow})$, outgoing longwave radiation $(R_{l\uparrow})$, net longwave radiation (R_{ln}) , net radiation (R_n) , and albedo. (Sign of the flux coming into the ecosystem is +, and the opposite direction is –. SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| Veen | $R_{s\downarrow}$ | $R_{s\uparrow}$ | R _{sn} | $R_{l\downarrow}$ | $R_{l\uparrow}$ | R _{ln} | R_n | Albedo |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------|--------|
| rear - | | | | MJ m ⁻² | ! | | | - |
| 2006 | 4,675 | -459 | 4,216 | 10,117 | -11,928 | -1,811 | 2,405 | 0.098 |
| 2007 | 4,516 | -434 | 4,082 | 10,104 | -11,884 | -1,779 | 2,303 | 0.096 |
| 2008 | 4,826 | -473 | 4,353 | 9,908 | -11,814 | -1,907 | 2,447 | 0.098 |
| 2009 | 4,794 | -411 | 4,383 | 9,891 | -11,854 | -1,963 | 2,420 | 0.086 |
| 2010 | 4,427 | -399 | 4,028 | 10,093 | -11,797 | -1,704 | 2,324 | 0.090 |
| Mean | 4,648 | -435 | 4,213 | 10,023 | -11,856 | -1,833 | 2,380 | 0.094 |
| SD | 173 | 31 | 158 | 113 | 53 | 103 | 63 | 0.005 |
| 2011 | 4,672 | -398 | 4,274 | 9,870 | -11,783 | -1,914 | 2,360 | 0.085 |
| 2012 | 4,948 | -458 | 4,490 | 9,852 | -11,820 | -1,968 | 2,522 | 0.093 |
| 2013 | 4,847 | -451 | 4,396 | 9,962 | -11,833 | -1,872 | 2,525 | 0.093 |
| 2014 | 5,051 | -535 | 4,516 | 10,108 | -11,993 | -1,885 | 2,631 | 0.106 |
| 2015 | 5,133 | -542 | 4,591 | 10,318 | -12,044 | -1,726 | 2,865 | 0.106 |
| Mean | 4,930 | -477 | 4,453 | 10,022 | -11,895 | -1,873 | 2,581 | 0.096 |
| SD | 180 | 61 | 122 | 194 | 116 | 90 | 186 | 0.009 |
| Diff(%) | 6 | 10 | 6 | 0 | 0 | 2 | 8 | 3 |
| 2016 | 5,089 | -522 | 4,567 | 10,266 | -11,855 | -1,588 | 2,979 | 0.103 |
| 2017 | 5,188 | -567 | 4,622 | 10,062 | -11,743 | -1,680 | 2,941 | 0.109 |
| 2018 | 5,205 | -538 | 4,667 | 10,069 | -11,706 | -1,637 | 3,030 | 0.103 |
| 2019 | 5,046 | -523 | 4,523 | 10,148 | -11,792 | -1,644 | 2,879 | 0.104 |
| 2020 | 4,897 | -525 | 4,372 | 10,259 | -11,772 | -1,513 | 2,858 | 0.107 |
| Mean | 5,085 | -535 | 4,550 | 10,161 | -11,774 | -1,613 | 2,938 | 0.105 |
| SD | 125 | 19 | 114 | 99 | 56 | 64 | 71 | 0.003 |
| Diff(%) | 9 | 23 | 8 | 1 | -1 | -12 | 23 | 12 |
| Mean (15 yr) | 4,888 | -482 | 4,405 | 10,069 | -11,841 | -1,773 | 2,633 | 0.098 |
| SD (15 yr) | 240 | 57 | 191 | 148 | 91 | 143 | 264 | 0.008 |



Figure 7. Annually integrated radiation balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) incoming shortwave radiation $(R_{s\downarrow})$, (b) outgoing shortwave radiation $(R_{s\uparrow})$, (c) net shortwave radiation (R_{sn}) , (d) incoming longwave radiation $(R_{l\downarrow})$, (e) outgoing longwave radiation $(R_{l\uparrow})$, (f) net longwave radiation (R_{ln}) , (g) net radiation (R_n) , and (h) albedo. (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.)

3.3. 에너지 수지

3.3.1. 기준상태 기간

Table 6 과 Fig. 8 에 연적산한 에너지 수지를 요약하였다. 기준상태 기간 동안 *R_n*의 35% (826±46 MJ m⁻² yr⁻¹)는 *LE*로, 25% (601±62 MJ m⁻² yr⁻¹)는 *H*로 소산되었다. *G* 는 *R_n*의 1% 미만(-16±14 MJ m⁻² yr⁻¹)이었고, *B* 역시 무시해도 될 만큼 작았다(~0%). 에너지 수지의 닫힘(*EBR*)은 0.60±0.02 이었다. 에너지항들과 에너지 수지 닫힘은 기준상태 기간 동안 큰 변동을 보이지 않았다.

3.3.2. 시험 기간

첫번째 시험 기간에 R_n 이 기준상태 기간 대비 평균 8% 증가하였는데, *LE*는 1%의 미미한 증가를 보인 반면에 *H*는 12% 증가하였다. *G*의 증가는 상대적으로 작았다. *LE*와 *H* 의 증가에도 불구하고 그 합은 R_n 의 증가분의 < 40% 여서 *EBR*은 0.58 로 감소하였다.

두번째 시험 기간 동안에는 에너지 유입이 더 많아져서 *R_n*이 기준상태 기간보다 23% 증가하였다. 이에 따라 *LE*도 평균 21% 증가하였으나, *H*는 오히려 기준상태 기간의 범위 이내로 감소하였다. 기준상태 기간 대비 *R_n*의 증가량은 연평균 568 MJ m⁻² yr⁻¹인데 반해, *LE*+*H* 의 증가분은 175 MJ m⁻² yr⁻¹인 30%에 불과해 *EBR*은 0.54 로 감소하여, 더 큰 에너지의 불균형이 있었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 에너지의 유입, 포획, 배분 및 소산 과정에 의해서 좌우되는 열역학 엔트로피 수지에 영향을 미칠 뿐만 아니라 이들을 기반으로 정량화 하고자 하는 자기-조직화 과정에 대한 중요한 몇 가지 질문을 갖게 하는데, 논의에서 이 부분을 다루었다.

Table 6. Annually integrated energy balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): net radiation (R_n) , latent heat flux (LE), sensible heat flux (H), ground heat flux (G), biomass heat storage (B), and energy balance ratio (EBR). (Sign of the flux coming into the soil and biomass is +, and the opposite direction is –. SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| Voor | R_n | LE | Н | G | В | EBR |
|--------------|-------|-------|--------------------|-----|------|------|
| Tear - | | | MJ m ⁻² | | | - |
| 2006 | 2,405 | 837 | 594 | 5 | 0.1 | 0.60 |
| 2007 | 2,303 | 805 | 532 | -14 | -1.2 | 0.58 |
| 2008 | 2,447 | 899 | 609 | -16 | 0.1 | 0.61 |
| 2009 | 2,420 | 813 | 698 | -34 | -0.7 | 0.62 |
| 2010 | 2,324 | 776 | 570 | -20 | 0.4 | 0.57 |
| Mean | 2,380 | 826 | 601 | -16 | -0.3 | 0.60 |
| SD | 63 | 46 | 62 | 14 | 0.6 | 0.02 |
| 2011 | 2,360 | 814 | 673 | -26 | 1.3 | 0.62 |
| 2012 | 2,522 | 800 | 623 | -17 | -1.2 | 0.56 |
| 2013 | 2,525 | 815 | 636 | -6 | 1.4 | 0.57 |
| 2014 | 2,631 | 845 | 728 | -18 | 0.0 | 0.59 |
| 2015 | 2,865 | 895 | 700 | -30 | 0.7 | 0.55 |
| Mean | 2,581 | 834 | 672 | -19 | 0.4 | 0.58 |
| SD | 186 | 38 | 44 | 9 | 1.1 | 0.03 |
| Diff (%) | 8 | 1 | 12 | 21 | - | -2 |
| 2016 | 2,979 | 914 | 681 | -14 | 0.3 | 0.53 |
| 2017 | 2,941 | 1,004 | 598 | -33 | -0.7 | 0.54 |
| 2018 | 3,030 | 1,075 | 643 | -28 | -0.2 | 0.56 |
| 2019 | 2,879 | 1,054 | 563 | -30 | -0.7 | 0.56 |
| 2020 | 2,858 | 950 | 530 | -42 | -0.1 | 0.51 |
| Mean | 2,938 | 999 | 603 | -29 | -0.3 | 0.54 |
| SD | 71 | 68 | 60 | 10 | 0.4 | 0.02 |
| Diff (%) | 23 | 21 | 0 | - | 13 | -9 |
| Mean (15 yr) | 2,633 | 886 | 625 | -22 | 0.0 | 0.57 |
| SD (15 yr) | 264 | 96 | 62 | 12 | 0.8 | 0.03 |



Figure 8. Annually integrated energy balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) net radiation (R_n) , (b) latent heat flux (LE), (c) sensible heat flux (H), (d) ground heat flux (G), (e) biomass heat storage (B), and (f) energy balance ratio (EBR). (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.)

3.4. 열역학 엔트로피 수지

3.4.1. 기준상태 기간

연적산한 열역학 엔트로피 수지를 Table 7 과 Fig. 9 에 요약하였다. 기준상태 기간 동안 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피인 σ는 13.8±0.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹ 이었다. σ는 σ_{Rsn}과 σ_{Rl}으로 구성되는데, 후자인 장파복사의 기여도는 무시할 만큼 작다. 시스템 외부로 수송된 열역학 엔트로피인 *J*는 -10.4±0.5 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹ 이었다. 이를 구성하는 주요 성분인 *J_{Rsn}*, *J_{Rln}*, *J_{LE}* 그리고 *J_H* 중에서, 시스템 외부에서 내부로 수송하는 *J_{Rsn}*의 기여도는 약 -7%, 내부에서 외부로 수송하는 나머지 세 항들의 기여도는 각각 평균 62%, 26%, 20% 였다. 그 결과, GDK 는 기준상태 기간 동안 생성된 열역학 엔트로피인 *dS*/*dt*는 3.3±0.1 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹ 이었다. 기준상태 기간 동안 σ와 *J*의 크기 변동은 유사하여, *dS*/*dt*는 거의 변하지 않고 일관되게 유지되었다.

3.4.2. 시험 기간

첫번째 시험 기간에는 σ가 지속적으로 증가하여 기준상태 기간보다 평균 5% 증가하였다. J에 기여하는 주요항들(i.e., J_{Rln}, J_{LE}, J_H)은 대부분 기준상태 기간의 범위 안에 있었고, 그 결과 dS/dt는 기준상태 기간보다 큰 변동을 보이며 증가하여, 엔트로피 축적이 평균 12% (0.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹) 증가하였다.

두번째 시험 기간에도 σ의 증가가 지속되어 기준상태 기간보다 평균 9% 증가하였다. J의 경우는 J_{Rln}(기준상태 기간보다 평균 9% 감소)와 J_{LE} (기준상태 기간보다 평균 21% 증가)의 변동이 서로 상쇄되면서 시험 기간 후반에 그 크기가 다소 감소하였다. 그 결과, *dS/dt*가 더 증가하여 기준상태 기간보다 엔트로피 축적이 평균 43% (약 1.5 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹) 증가하였다.

Table 7. Annually integrated thermodynamic entropy balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): production terms (σ_{Rsn} , $\sigma_{Rl\downarrow}$, σ), transfer terms (J_{Rsn} , $J_{Rl\downarrow}$, $J_{Rl\uparrow}$, J_{Rln} , J_{LE} , J_H , J_G , J_B , J), and net ecosystem exchange of thermodynamic entropy (dS/dt). (Sign of the flux coming into the ecosystem is +, and the opposite direction is –. SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| Voor | σ_{Rsn} | $\sigma_{Rl\downarrow}$ | σ | J_{Rsn} | $J_{Rl\downarrow}$ | $J_{Rl\uparrow}$ | J_{Rln} | J_{LE} | J_H | J_G | J_B | J | dS/dt |
|---------|----------------|-------------------------|------|-----------|--------------------|------------------|------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Icai | | | | | | | MJ m ⁻² K ⁻¹ | | | | | | |
| 2006 | 13.8 | 0.0 | 13.8 | 0.7 | 35.3 | -41.6 | -6.4 | -2.8 | -2.1 | 0.0 | 0.00 | -10.5 | 3.3 |
| 2007 | 13.4 | 0.0 | 13.4 | 0.7 | 35.2 | -41.5 | -6.3 | -2.6 | -1.9 | 0.1 | 0.01 | -10.0 | 3.4 |
| 2008 | 14.3 | -0.1 | 14.2 | 0.8 | 34.7 | -41.4 | -6.6 | -2.9 | -2.1 | 0.1 | 0.00 | -10.9 | 3.3 |
| 2009 | 14.3 | -0.1 | 14.2 | 0.8 | 34.7 | -41.5 | -6.8 | -2.6 | -2.4 | 0.1 | 0.01 | -10.9 | 3.2 |
| 2010 | 13.2 | 0.1 | 13.3 | 0.7 | 35.2 | -41.3 | -6.1 | -2.5 | -2.0 | 0.1 | 0.00 | -9.9 | 3.4 |
| Mean | 13.8 | 0.0 | 13.8 | 0.7 | 35.0 | -41.5 | -6.4 | -2.7 | -2.1 | 0.1 | 0.00 | -10.4 | 3.3 |
| SD | 0.5 | 0.1 | 0.4 | 0.0 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.00 | 0.5 | 0.1 |
| 2011 | 14.1 | -0.1 | 14.0 | 0.7 | 34.6 | -41.3 | -6.7 | -2.7 | -2.4 | 0.1 | 0.00 | -10.9 | 3.1 |
| 2012 | 14.7 | -0.2 | 14.6 | 0.8 | 34.6 | -41.4 | -6.8 | -2.6 | -2.2 | 0.1 | 0.01 | -10.8 | 3.8 |
| 2013 | 14.4 | -0.1 | 14.4 | 0.8 | 34.8 | -41.4 | -6.5 | -2.7 | -2.2 | 0.0 | 0.00 | -10.7 | 3.7 |
| 2014 | 14.8 | -0.1 | 14.7 | 0.8 | 35.2 | -41.8 | -6.6 | -2.8 | -2.5 | 0.1 | 0.00 | -11.0 | 3.7 |
| 2015 | 14.9 | 0.1 | 15.0 | 0.8 | 35.8 | -41.9 | -6.1 | -2.9 | -2.4 | 0.1 | 0.00 | -10.6 | 4.4 |
| Mean | 14.6 | -0.1 | 14.5 | 0.8 | 35.0 | -41.6 | -6.5 | -2.7 | -2.3 | 0.1 | 0.00 | -10.8 | 3.7 |
| SD | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.0 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.00 | 0.2 | 0.5 |
| Dif (%) | 6 | - | 5 | 6 | 0 | 0 | 2 | 2 | 12 | 19 | - | 3 | 12 |
| 2016 | 15.0 | 0.2 | 15.1 | 0.8 | 35.7 | -41.5 | -5.8 | -3.0 | -2.4 | 0.1 | 0.00 | -10.3 | 4.8 |

| 2017 | 15.2 | 0.1 | 15.3 | 0.8 | 35.1 | -41.1 | -6.0 | -3.3 | -2.1 | 0.1 | 0.01 | -10.5 | 4.8 | |
|--------------|------|-----|------|-----|------|-------|------|------|------|-----|------|-------|-----|--|
| 2018 | 15.3 | 0.1 | 15.4 | 0.8 | 35.1 | -41.0 | -5.9 | -3.5 | -2.2 | 0.1 | 0.00 | -10.8 | 4.7 | |
| 2019 | 14.8 | 0.1 | 14.9 | 0.8 | 35.3 | -41.3 | -5.9 | -3.5 | -1.9 | 0.1 | 0.01 | -10.4 | 4.5 | |
| 2020 | 14.4 | 0.2 | 14.6 | 0.8 | 35.7 | -41.3 | -5.6 | -3.1 | -1.8 | 0.2 | 0.00 | -9.6 | 5.0 | |
| Mean | 14.9 | 0.1 | 15.1 | 0.8 | 35.4 | -41.2 | -5.9 | -3.3 | -2.1 | 0.1 | 0.00 | -10.3 | 4.8 | |
| SD | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.00 | 0.4 | 0.2 | |
| Dif (%) | 8 | - | 9 | 8 | 1 | -1 | -9 | 21 | 0 | - | - | -1 | 43 | |
| Mean (15 yr) | 14.4 | 0.0 | 14.5 | 0.8 | 35.1 | -41.4 | -6.3 | -2.9 | -2.2 | 0.1 | 0.00 | -10.5 | 3.9 | |
| SD (15 yr) | 0.6 | 0.1 | 0.7 | 0.0 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.00 | 0.4 | 0.7 | |



Figure 9. Annually integrated thermodynamic entropy balance from 2006 to 2020 observed in the Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK): (a) σ_{Rsn} , (b) $\sigma_{Rl\downarrow}$, (c) σ , (d) J_{Rsn} , (e) J_{Rln} , (f) J_{LE} , (g) J_H , (h) J_G , (i) J_B , (j) J, and (k) dS/dt. (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.)

3.5. 자기-조직화

3.5.1. 기준상태 기간

노령림인 GDK 의자기-조직화 과정을 정량적으로 보여주는 |J/ਗ਼는 기준상태 기간 동안 평균 0.76±0.01 이었고, 이 기간 동안 다양한 환경 변화 속에서도 큰 경년 변동 없이 이 값을 유지하는 자기-조직화 역량을 보였다(Table 8, Fig. 10).

3.5.2. 시험 기간

첫번째 시험 기간에는 σ가 평균 0.7 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹ 증가한 반면, *J* 는 그 크기가 다소 적게 증가하여 |*J*/σ|가 점차 감소하는 경향을 보였으나 유의한 차이는 아니었다. 그러나 두번째 시험 기간에는 σ가 더 커진 반면에 *J* 는 오히려 그 크기가 감소하였다. |*J*/σ|는 유의한 차이를 보이며 기준상태 기간보다 평균 10% 감소하여 자기-조직화가 최근에 저하되었음을 보였다.

| Vera | σ | J | $ J/\sigma $ |
|--------------|------|---------------------------------|--------------|
| Year — | MJ 1 | m ⁻² K ⁻¹ | - |
| 2006 | 13.8 | -10.5 | 0.76 |
| 2007 | 13.4 | -10.0 | 0.75 |
| 2008 | 14.2 | -10.9 | 0.77 |
| 2009 | 14.2 | -10.9 | 0.77 |
| 2010 | 13.3 | -9.9 | 0.74 |
| Mean | 13.8 | -10.4 | 0.76 |
| SD | 0.4 | 0.5 | 0.01 |
| 2011 | 14.0 | -10.9 | 0.78 |
| 2012 | 14.6 | -10.8 | 0.74 |
| 2013 | 14.4 | -10.7 | 0.74 |
| 2014 | 14.7 | -11.0 | 0.75 |
| 2015 | 15.0 | -10.6 | 0.70 |
| Mean | 14.5 | -10.8 | 0.74 |
| SD | 0.4 | 0.2 | 0.03 |
| Diff (%) | 5 | 3 | -2 |
| 2016 | 15.1 | -10.3 | 0.68 |
| 2017 | 15.3 | -10.5 | 0.69 |
| 2018 | 15.4 | -10.8 | 0.70 |
| 2019 | 14.9 | -10.4 | 0.70 |
| 2020 | 14.6 | -9.6 | 0.66 |
| Mean | 15.1 | -10.3 | 0.68 |
| SD | 0.3 | 0.4 | 0.02 |
| Diff (%) | 9 | -1 | -10 |
| Mean (15 yr) | 14.5 | -10.5 | 0.73 |
| SD (15 yr) | 0.7 | 0.4 | 0.04 |

Table 8. Self-organization $(|J/\sigma|)$ from 2006 to 2020 observed in Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK). (Sign of the entropy transported out of the ecosystem is –. SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)



Figure 10. Self-organization $(|J/\sigma|)$ from 2006 to 2020 observed in Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK). (The blue and yellow horizontal dotted lines indicate the maximum and minimum values of reference state period, respectively.)

3.6. 통계 분석

기준상태 기간과 시험 기간의 관측값들이 통계적으로 유의한 차이가 있는지 확인하기 위해, 각 기간별 연적산 또는 연평균한 변수들의 평균을 비교하였다 (Table 9). 환경 요인의 경우, R_{s1} 가 두 시험 기간에 걸쳐 유의한 차이를 보이며 지속적으로 증가하였다. *SWC와 VPD*의 경우, 첫번째 시험 기간에 유의한 작은 감소를 보였으나, 두번째 시험 기간에는 유의한 차이를 보이지 않았다. *PPT*의 경우, 첫번째 시험 기간 동안 급격하게 감소하였고, 두번째 시험 기간 동안에도 이어진 낮은 강수량(2020 년 제외)으로 인해 기준상태 기간 대비 평균 15%가 감소하였다. 그럼에도 불구하고 유의한 차이가 없는 것으로 나타난 것은 2011 년과 2020 년의 강수 변화와 같은 급격한 변동 때문이거나(Fig. 6a), 또는 강수량 측정의 불확도나 공간 변이가 큰 데 반해 상대적으로 유의도를 높게 설정한 결과로 사료된다.

복사 수지의 경우, R_{s1} , R_{sn} , 그리고 알베도가 두 시험 기간에 걸쳐 지속적으로 증가하며 유의한 차이를 보였다. 장파 복사의 경우, 두번째 시험 기간에만 유의한 차이를 보이며 R_{l1} 은 소폭 증가하고 R_{l1} 은 크기가 소폭 감소하여 R_{ln} 의 크기가 평균 12% 감소하였다.

에너지 수지의 경우, *R_n*이 두 시험 기간에 걸쳐 모두 유의한 차이를 보이며 지속적으로 증가하였다. *LE*는 첫번째 시험 기간에는 유의한 차이를 보이지 않았고 두번째 시험 기간에 평균 21% 증가하며 유의한 차이를 보였다. 이와 달리, *H*는 첫번째 시험 기간에 10% 이상 증가하며 유의한 차이를 보였으나, 두번째 시험 기간에는 오히려 감소하여 기준상태 기간과 비교하여 유의한 차이를 보이지 않았다. *EBR*은 두번째 시험 기간에 유의한 차이를 보이며 감소하였다.

열역학 엔트로피 수지의 경우, σ의 주성분인 σ_{Rsn}가 지속적으로 증가하며 두 시험 기간에 모두 유의한 차이를 보였다. J의 경우, 주요 기여 성분인 장파복사와 LE에 관련된 엔트로피 수송항들(J_{Rl1}, J_{Rl1}, J_{Rln}, J_{LE})이 모두 첫번째 시험 기간에는 유의한 차이를 보이지 않았고, 두번째 시험 기간에는 유의성 있는 소폭의 증감을

보였다. *J*_H의 경우, *H*와 마찬가지로 기준상태 기간과 비교하여 첫번째 시험 기간에 12%의 유의한 증가를 보였으나, 두번째 시험 기간에는 감소하여 차이가 없었다. 결과적으로 *J*는 두 시험 기간동안 유의한 차이를 보이지 않았지만, σ와 *J*의 합인 *dS/dt*는 두 시험 기간 동안 모두 유의한 증가를 보였다. 자기-조직화를 나타내는

Table 9. Statistics of annually integrated or averaged environmental factors, radiation balance, energy balance, thermodynamic entropy balance, and self-organization for reference state period and test periods. (* indicates statistically significant at $\alpha = 0.1$.)

| Period | Reference state period (2006–2010) | | First (20 | t test perio)11–2015) | od) | Second test period (2016–2020) | | | |
|-------------------------|--|-----------|--------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------|-----------------|--|
| Statistics | Mean | SD | Mean | SD | <i>p</i> -value | Mean | SD | <i>p</i> -value | |
| Environmer | ntal factors | - | | - | - | - | - | - | |
| PPT | 1,478 | 151 | 1,348 | 568 | 0.58 | 1,262 | 329 | 0.14 | |
| $R_{s\downarrow}$ | 4,648 | 173 | 4,930 | 180 | 0.00* | 5,085 | 125 | 0.00* | |
| T _{air} | 11.3 | 0.4 | 10.9 | 0.7 | 0.24 | 11.1 | 0.5 | 0.45 | |
| SWC | 0.27 | 0.02 | 0.23 | 0.02 | 0.00* | 0.27 | 0.01 | 0.92 | |
| VPD | 7.2 | 0.6 | 6.2 | 0.7 | 0.01* | 6.9 | 0.3 | 0.35 | |
| Radiation b | alance | | | | | | | | |
| $R_{s\downarrow}$ | 4,648 | 173 | 4,930 | 180 | 0.00* | 5,085 | 125 | 0.00* | |
| $R_{s\uparrow}$ | -435 | 31 | -477 | 61 | 0.12 | -535 | 19 | 0.00* | |
| R_{sn} | 4,213 | 158 | 4,453 | 122 | 0.00* | 4,550 | 114 | 0.00* | |
| $R_{l\downarrow}$ | 10,023 | 113 | 10,022 | 194 | 0.99 | 10,161 | 99 | 0.02* | |
| $R_{l\uparrow}$ | -11,856 | 53 | -11,895 | 116 | 0.49 | -11,774 | 56 | 0.01* | |
| R_{ln} | -1,833 | 103 | -1,873 | 90 | 0.47 | -1,613 | 64 | 0.00* | |
| Albedo | 0.094 | 0.005 | 0.096 | 0.009 | 0.01* | 0.105 | 0.003 | 0.00* | |
| Energy bala | ince | | | | | | | | |
| R_n | 2,380 | 63 | 2,581 | 186 | 0.01* | 2,938 | 71 | 0.00* | |
| LE | 826 | 46 | 834 | 38 | 0.73 | 999 | 68 | 0.00* | |
| Н | 601 | 62 | 672 | 44 | 0.02* | 603 | 60 | 0.94 | |
| G | -16 | 14 | -19 | 9 | 0.62 | -29 | 10 | 0.05* | |
| В | -0.3 | 0.6 | 0.4 | 1.1 | 0.16 | -0.3 | 0.4 | 0.92 | |
| EBR | 0.60 | 0.02 | 0.58 | 0.03 | 0.29 | 0.54 | 0.02 | 0.00* | |
| Thermodyn | amic entropy | v balance | | | | | | | |
| σ_{Rsn} | 13.8 | 0.5 | 14.6 | 0.4 | 0.00* | 14.9 | 0.4 | 0.00* | |
| $\sigma_{Rl\downarrow}$ | 0.0 | 0.1 | -0.1 | 0.1 | 0.56 | 0.1 | 0.1 | 0.00* | |
| σ | 13.8 | 0.4 | 14.5 | 0.4 | 0.00* | 15.1 | 0.3 | 0.00* | |
| J_{Rsn} | 0.7 | 0.0 | 0.8 | 0.0 | 0.00* | 0.8 | 0.0 | 0.00* | |
| $J_{Rl\downarrow}$ | 35.0 | 0.3 | 35.0 | 0.5 | 0.96 | 35.4 | 0.3 | 0.02* | |
| $J_{Rl\uparrow}$ | -41.5 | 0.1 | -41.6 | 0.3 | 0.51 | -41.2 | 0.2 | 0.01* | |

| J_{Rln} | -6.4 | 0.3 | -6.5 | 0.2 | 0.46 | -5.9 | 0.2 | 0.00* |
|--------------|--------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| J_{LE} | -2.7 | 0.2 | -2.7 | 0.1 | 0.57 | -3.3 | 0.2 | 0.00* |
| J_H | -2.1 | 0.2 | -2.3 | 0.1 | 0.01* | -2.1 | 0.2 | 0.96 |
| J_G | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.60 | 0.1 | 0.0 | 0.03* |
| J_B | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.68 |
| J | -10.4 | 0.5 | -10.8 | 0.2 | 0.10 | -10.3 | 0.4 | 0.59 |
| dS/dt | 3.3 | 0.1 | 3.7 | 0.5 | 0.03* | 4.8 | 0.2 | 0.00* |
| Self-organiz | zation | | | | | | | |
| $ J/\sigma $ | 0.76 | 0.01 | 0.74 | 0.03 | 0.17 | 0.68 | 0.02 | 0.00* |
| | | | | | | | | |

4. 논 의

본 연구에서는 생태계 온전성을 '생태계의 자기-조직화 역량이 기준상태의 그것과 유의하게 다르지 않은 상태'라고 재정의하였다. GDK 에서 15 년(2006-2020 년) 동안 관측된 자료를 기반으로 열역학 엔트로피의 생성 대비 수송의 비율([J/σ])을 계산하여 자기-조직화를 정량화 하였다. 그리고 그 변화를 살펴본 결과, 기준상태 기간(2006-2010 년)에 비해 두번째 시험 기간(2016-2020 년) 동안에 [J/σ]가 통계적으로 유의하게 감소함을 보임으로써, GDK 의 온전성이 최근에 저하되었음을 확인하였다. 또한 엔트로피 생성과 수송의 합인 *dS/dt*를 살펴보면, 두 시험 기간 동안 모두 유의하게 증가하여서 자기-조직화의 감소가 점차적으로 진행되었음을 시사한다.

GDK 의 열역학 엔트로피 수지와 자기-조직화 결과를 다른 생태계에서 보고된 연구 결과와 비교하였다. 비록 다른 산림 생태계에 대한 자료는 찾을 수 없었으나, 미국 중서부의 초지 생태계의 경우, σ가 15.5~16.0 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, *J*는 –12.5~–11.8 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, 그리고 |*J*/σ|는 0.76~0.78 이었다(Brunsell *et al.*, 2011). 미국 네브라스카의 관개된 옥수수 농경지의 경우, σ는 13.3~16.1 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, *J*는 –13.7~–11.7 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, 그리고 |*J*/σ|는 0.81~0.91 이었다(Yang *et al.*, 2020). 노령림인 GDK 의 경우, σ는 13.3~15.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, *J*는 –11.0~–9.6 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, 그리고 |*J*/σ|는 0.66~0.78 로서, 대체로 낮은 범위에 놓여 있다.

GDK 의 자기-조직화 역량이 저하되는 원인을 파악하기 위해, 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들의 2006-2020 년 기간의 시계열 자료와 $|J/\sigma|$ 의 변화 간의 상관관계를 살펴보았다. 선행연구들은 하향단파복사 대비 순복사($R_n/R_{s\downarrow}$), 생물량 대비 호흡량, 증발산 대비 증산, 양분 용탈, 생물다양성 등의 상태변수들이 생태계의 자기-조직화 역량과 상관관계가 있다고 제안하였다(Appendix 1). 본 연구 결과에서는 $R_n/R_{s\downarrow}$ (즉 에너지 포획)과 생물량

대비 호흡량의 증가가 |J/σ| 의 감소와 음의 상관관계를 보였고, 교목의 종다양성의 감소가 양의 상관관계를 보였다(Table 10).

Table 10. Correlations between state variables representing ecosystem function & structure and self-organization $(|J/\sigma|)$. (*r* is correlation coefficient and * indicates statistically significant at $\alpha = 0.1$.)

| Year | $R_n/R_{s\downarrow}$ (Energy capture) | Respiration | Biomass | Respiration/ Biomass | Species diversity of trees |
|-----------------|--|---------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| | - | g C m ⁻² | ton ha ⁻¹ | - | - |
| 2006 | 0.51 | 980 | - | - | - |
| 2007 | 0.51 | 1,113 | 265 | 4.20 | 2.13 |
| 2008 | 0.51 | 1,175 | 269 | 4.37 | 2.14 |
| 2009 | 0.50 | 1,168 | 288 | 4.05 | 2.12 |
| 2010 | 0.53 | 976 | 290 | 3.36 | 2.11 |
| 2011 | 0.51 | 1,163 | 292 | 3.98 | 2.12 |
| 2012 | 0.51 | 1,103 | 294 | 3.75 | 2.09 |
| 2013 | 0.52 | 1,019 | 302 | 3.38 | 2.07 |
| 2014 | 0.52 | 1,123 | 304 | 3.70 | 2.06 |
| 2015 | 0.56 | 1,232 | 307 | 4.01 | 2.07 |
| 2016 | 0.59 | 1,490 | 309 | 4.82 | 2.05 |
| 2017 | 0.57 | 1,584 | 304 | 5.20 | 2.02 |
| 2018 | 0.58 | 1,454 | 319 | 4.55 | 2.03 |
| 2019 | 0.57 | 1,941 | 282 | 6.89 | 1.93 |
| 2020 | 0.58 | 1,937 | 291 | 6.65 | 1.92 |
| Mean (15 yr) | 0.54 | 1,297 | 294 | 4.00 | 2.06 |
| SD (15 yr) | 0.03 | 317 | 15 | 0.44 | 0.07 |
| r | -0.96* | -0.80* | -0.46 | -0.68* | 0.82* |

자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 상태변수들 중에, 노령림인 GDK는 태양으로부터의 에너지 유입인 *R*_s↓가 기준상태 기간에 비해 지속적으로 증가하는 상황에서, 실제로 포획하는 에너지의 비율인 에너지 포획(즉 *R_n/R_s*↓)을 줄이지 못하고 오히려 늘리는 반응을 보였다. 이로 인해 노령림이 사용할 수 있는 양을 초과한 잉여분의 에너지가 시스템 내부에 쌓이고 소산되어서, 쓸모 없는 에너지의 형태로 변환된 σ가 증가한 것으로 볼 수 있다.

생물량 대비 호흡량이 증가한 이유는 GDK 의 호흡량(RE)이 기준상태 기간에 비해 두번째 시험 기간에 ~1.5 배 이상 증가한 반면, 생물량은 그보다 증가폭이 작았기 때문이다. 그 이유는 최근 호우나 강풍 등의 자연적인 교란으로 인해 졸참나무 위주의 대경목들이 쓰러져 고사하였고 이로 인해 생물량의 증가폭은 줄어든 반면(Park *et al.*, 2018), 고사목을 제거하지 않고 그대로 두는 GDK 에서의 관리 원칙 상 고사목이 분해되면서 배출된 탄소가 RE를 증가시켰기 때문으로 추정된다(Yang *et al.*, 2021).

GDK 에서는 교목의 종다양성 뿐만 아니라 하부 식생인 관목과 초목의 종다양성도 지난 15 년 동안 줄어드는 현상이 보고되었다(Cho *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021). 이에 대한 명확한 이유는 밝혀지지 않았지만 두 가지 가능성이 제시되었다: (1) 이 노령림이 대도시에 인접해 있어서 대기오염, 토양 산성화, 기후변화 등의 부정적인 영향을 받았거나(KNA, 2020a), 혹은 (2) 산림이 노령화됨에 따라 상층이 울폐되고 하층에 들어오는 빛이 줄어들어 하층 식생이 단순해졌기 때문이다(Kim *et al.*, 2021).

GDK 에서 자기-조직화의 저하에 동반된 생물량 대비 호흡량의 증가와 교목의 종다양성 감소는 선행연구들이 예상한 상관관계를 보인 반면, *R_n/R_s*의 증가, *RE*의 증가, 생물량의 증가는 예상과 상반되었다(Kandziora *et al.*, 2013; Kutsch *et al.*, 2001; Müller, 2005; Müller *et al.*, 2000). 이 결과는 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들의 집합으로 온전성을 간접적으로 평가하려는 선행연구들의 시도에 한계가 있음을 보여 준다.

자기-조직화를 결정하는 σ 와 J의 역할과 상호작용을 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해, 각각의 30 분 단위 시계열 자료에서 정보 엔트로피(information entropy, I), 즉 불확정성(indeterminacy)을 계산하였다(Table 11). I 의 증가는 자기-조직화(self-organization, SO)의 감소를 의미하며, I와 SO 간의 균형으로 정의되는 복잡성(complexity, C)은 생태계 온전성과 관련된 복잡계의 중요한 특성이다(Fernández & Gershenson, 2014; Santamaría-Bonfil *et al.*, 2017). 자세한 설명과 계산 과정은 Appendix 7 에서 찾아볼 수 있다.

기준상태 기간 동안 σ 의 정보 엔트로피(I_{σ})는 0.61±0.01 이었고, J의 정보 엔트로피(I_J)는 0.55±0.04 였다. 두 시험 기간 동안에 I_{σ} 는 점차적으로 증가한 반면, I_J 는 첫번째 시험 기간에 감소했다가 두번째 시험 기간에 기준상태 기간보다 더 크게 증가하였다(Table 11). σ 와 J의 불확정성이 증가하였으나 그 증가폭은 σ 가 더 컸다. 불확정성의 증가는 자기-조직화의 감소를 의미하기 때문에, 온전성의 저하는 열역학 엔트로피 생성과 수송 중에서 전자인 생성에 관련된 자기-조직화가 상대적으로 더 감소했기 때문으로 해석된다. 다시 말하면, 에너지 유입의 지속적인 증가로 인한 압박을 줄이기 위해 노령림이 과잉 에너지를 외부로 돌려보냄으로써 내부 엔트로피의 생산을 최소화하는 자기-조직화 역량(i.e., SO_{σ})이 상대적으로 역할을 하지 못했음을 의미한다. 두번째 시험기간에는 SO_{σ} 와 SO_{J} 가 모두 감소했으나 그 변화 과정이 달랐고, SO_{J} 의 감소폭이 더 컸다. 그러나 C를 살펴보면, $I와 SO 간의 조화로운 균형을 통해 <math>C_{J}$ 가 C_{σ} 보다 조금 더 높은 복잡성을 유지했음을 알 수 있다.

총체적인 자기-조직화는 σ 와 J의 합인 dS/dt의 I와 SO의 변화와 그 상호작용을 통해 살펴볼 수 있다. Table 11 에서 기준상태 기간에 I_{dS/dt}와 SO_{dS/dt}의 값이 각각 0.58 과 0.42 로 균형을 이루어 복잡성인 C_{dS/dt}가 0.97 로 매우 높았다. 그 후 첫번째 시험 기간 동안에는 자기-조직화가 증가하면서, I_{dS/dt}와 SO_{dS/dt}가 각각 0.48 과 0.52 로 더 균형을 이루어 복잡성이 0.98 로 더 향상되었다. 그러나 두번째 시험 기간 동안에는 자기-조직화가 기준상태 기간보다 더 낮아졌고 복잡성도 0.93 으로 저하되었다. 이 결과는 σ와 J의 상대적인 비율인 |J/σ)와 더불어 둘의 합인 *dS*/*dt*, 그리고 *dS*/*dt* 시계열의 복잡성도 온전성의 또 다른 유용한 지표로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

| Year | I_{σ} | SO_{σ} | C_{σ} | Ij | SO _J | C_J | I _{dS/dt} | SO _{dS/dt} | $C_{dS/dt}$ |
|----------|--------------|---------------|--------------|------|-----------------|-------|--------------------|---------------------|-------------|
| 2006 | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.60 | 0.40 | 0.96 |
| 2007 | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.52 | 0.48 | 1.00 | 0.61 | 0.39 | 0.95 |
| 2008 | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.50 | 0.50 | 1.00 | 0.57 | 0.43 | 0.98 |
| 2009 | 0.62 | 0.38 | 0.94 | 0.54 | 0.46 | 0.99 | 0.62 | 0.38 | 0.95 |
| 2010 | 0.59 | 0.41 | 0.97 | 0.56 | 0.44 | 0.98 | 0.49 | 0.51 | 1.00 |
| Mean | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.55 | 0.45 | 0.98 | 0.58 | 0.42 | 0.97 |
| SD | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 0.02 |
| 2011 | 0.64 | 0.36 | 0.92 | 0.44 | 0.56 | 0.99 | 0.45 | 0.55 | 0.99 |
| 2012 | 0.62 | 0.38 | 0.94 | 0.60 | 0.40 | 0.96 | 0.51 | 0.49 | 1.00 |
| 2013 | 0.57 | 0.43 | 0.98 | 0.51 | 0.49 | 1.00 | 0.46 | 0.54 | 0.99 |
| 2014 | 0.64 | 0.36 | 0.92 | 0.45 | 0.55 | 0.99 | 0.41 | 0.59 | 0.97 |
| 2015 | 0.63 | 0.37 | 0.93 | 0.58 | 0.42 | 0.98 | 0.60 | 0.40 | 0.96 |
| Mean | 0.62 | 0.38 | 0.94 | 0.52 | 0.48 | 0.98 | 0.49* | 0.51* | 0.98 |
| SD | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 0.02 |
| Diff (%) | 2 | -3 | -1 | -6 | 7 | 0 | -16 | 21 | 1 |
| 2016 | 0.64 | 0.36 | 0.92 | 0.60 | 0.40 | 0.96 | 0.68 | 0.32 | 0.88 |
| 2017 | 0.77 | 0.23 | 0.71 | 0.56 | 0.44 | 0.99 | 0.53 | 0.47 | 1.00 |

Table 11. Information entropy (*I*), self-organization (*SO*), and complexity (*C*) of the half-hourly time series of thermodynamic entropy production (σ), transfer (*J*), and net ecosystem exchange of entropy (dS/dt) from 2006 to 2020 observed in Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK). (SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. * indicates statistically significant at $\alpha = 0.1$. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| 2018 | 0.65 | 0.35 | 0.91 | 0.61 | 0.39 | 0.95 | 0.63 | 0.37 | 0.93 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 2019 | 0.63 | 0.37 | 0.93 | 0.58 | 0.42 | 0.97 | 0.64 | 0.36 | 0.92 |
| 2020 | 0.62 | 0.38 | 0.94 | 0.58 | 0.42 | 0.97 | 0.63 | 0.37 | 0.93 |
| Mean | 0.66* | 0.34* | 0.88* | 0.59* | 0.41* | 0.97 | 0.62 | 0.38 | 0.93* |
| SD | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| Diff (%) | 8 | -13 | -7 | 7 | -9 | -2 | 8 | -11 | -4 |
| Mean (15 yr) | 0.63 | 0.37 | 0.92 | 0.55 | 0.45 | 0.98 | 0.56 | 0.44 | 0.96 |
| SD (15 yr) | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 0.04 |

GDK 에서 관측된 15 년 간의 환경 변화 및 노령림의 반응을 정리해 보면, 환경 변화의 경우 기준상태 기간 이후 지난 10 년 동안 지속적인 PPT 의 감소(2011 년과 2020 년 제외)로 인해 기준상태 기간보다 더 많은 R_{s1}가 꾸준히 GDK 로 유입되었다. 유입되는 추가 에너지를 빠르게 증가하는 생물량에 저장함으로써 효율적으로 사용할 수 있는 유령림이나 장령림과는 달리, 노령림의 경우 에너지 유입의 지속적인 증가는 스트레스가 될 수 있다. 열역학적으로 에너지 유입이 증가하면 생태계는 이 중에 일부를 포획하고, 자기-조직화 과정을 통해 필요 이상의 에너지는 다시 방출하거나 열의 형태로 소산시킨다(Fath *et al.*, 2004; Nielsen *et al.*, 2020).

노령림인 GDK 의 경우, 에너지 유입 및 포획의 증가에 따른 열역학 엔트로피 생성의 증가를 수송이 감당하지 못함에 따라 *J*/σ기가 감소하였고, 이러한 자기-조직화의 감소를 정의에 따라서 온전성의 저하로 해석하였다. *J*의 크기 조절에 관여하는 복사 및 에너지 수지 성분은 하향 및 상향 장파복사, 잠열 및 현열 플럭스 그리고 크기는 작지만 지중열 플럭스와 열저류항 등으로 매우 다양하다. 그러나 수동적으로 결정되는 하향단파복사가 주요 성분인 σ의 경우, 기여도가 미미한 하향장파복사를 제외하면, 상향단파복사가 유일한 조절 수단이어서 알베도가 중요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있다. 실제로 에너지 유입이 증가한 두 시험 기간 동안에 이를 반사시키는 알베도가 증가했으나, 에너지 유입의 증가분을 상쇄하기에는 부족했던 결과, σ가 시험 기간 동안 꾸준히 증가하였다. 한편 *J*의 크기가 σ의 그것만큼 증가하지 못한 이유로는, 지표면 온도와 대기 온도의 상대적인 차이로 결정되는 순장파복사를 통해 시스템 밖으로 수송되는 양의 감소를 들 수 있다. 또한 잠열 및 현열 플럭스를 통해 시스템 밖으로 수송되는 엔트로피의 양이 증가하였지만, 에너지 포획에 따른 내부 엔트로피의 증가를 상쇄할 만큼은 되지 못했다.

종합적으로, 생태계의 자기-조직화의 변화를 기준상태의 그것과 비교함으로써 생태계의 온전성을 평가할 수 있다는 본 연구의 방법론과 GDK를 사례로 보인 분석 결과가 매우 설득력이 있으며 생태계의 반응과 적응에 대한

총체적인 통찰력을 제공함을 알 수 있었다. 자기-조직화를 정량화 하기 위해 비평형 열역학 기반의 엔트로피 수지를 분석할 때, 열역학 엔트로피 생성과 수송의 상대적인 비율(IJ/σ)과 더불어 둘의 합인 순 엔트로피(dS/dt)도 유용한 지표로 사용할 수 있었다. 열역학 엔트로피의 시계열 자료가 충분할 경우, 정보 엔트로피를 함께 분석함으로써 열역학 기반의 자기-조직화의 정량화를 상호 보완할 수 있을 뿐만 아니라 정보 엔트로피 기반의 복잡성이 온전성의 또 다른 지표로 사용될 수 있음을 시사하였다.
5. 요약 및 결론

유네스코 생물권보전지역(BR)에서 생태계 온전성을 저하시키지 않으면서 생태계 서비스의 지속가능한 이용과 생물다양성 보전을 조화시키기 위해서는 온전성의 정량적인 평가와 지속적인 모니터링이 필요하다. 본 연구에서는 비평형 열역학을 기반으로 자기-조직화를 정량화 하여 기준상태의 그것과 비교하는 평가 방법을 제안하였다. BR 의 핵심구역에 위치한 광릉 낙엽활엽수 노령림(GDK)에서 15 년간 관측된 플럭스 및 생물리 자료를 이용해 생태계 온전성을 평가하여, 'GDK 에서 생태계 온전성이 유지되고 있는가?'라는 질문에 답하고자 하였다.

열역학적 관점의 자기-조직화는 생명 유지를 위해 시스템 내부에 생성된 열역학 엔트로피(σ)와 외부로 수송되는 열역학 엔트로피(J)를 조절하여 시스템 내부의 엔트로피 축적을 최소화 하는 과정이며, 두 엔트로피의 비율인 |J/σ|로 나타낼 수 있다. GDK 가 BR 로 지정된 2010 년을 기준으로 그 이전 5 년(2006-2010 년)을 기준상태로 가정하여 자기-조직화를 정량화하고 그 특징을 파악하는 기간으로 사용하였다. 그 이후 10 년(2011-2020 년)을 5 년씩 두 기간으로 나누어 시험 기간으로 정하고 각 기간의 자기-조직화를 정량화 하여 기준상태의 그것과 비교하였다.

주요 결과를 요약하면 다음과 같다:

(1) 기준상태 기간(2006-2010 년) 동안에는 주목할 만한 변동이 없었다.

- (a) 환경 요인의 경우, 주요 요인인 PPT (평균 1,478±151 mm yr⁻¹),
 R_{s↓}(4,648±173 MJ m⁻² yr⁻¹), 그리고 T_{air}(11.3±0.4 ℃ yr⁻¹)가 큰 변동을 보이지 않았고 30 년 평년 값과 크게 다르지 않았다.
- (b) 복사 수지의 경우, R_{s↑}(-435±31 MJ m⁻² yr⁻¹), 알베도(0.094±0.005), R_{ln}(-1,833±103 MJ m⁻² yr⁻¹), R_n(2,380±63 MJ m⁻² yr⁻¹)이 모두 특별한 변동을 보이지 않았다.

- (c) 에너지 수지의 경우, 주요 성분인 *LE*(826±46 MJ m⁻² yr⁻¹), *H*(601±62 MJ m⁻² yr⁻¹), 그리고 *EBR*(0.60±0.02)도 큰 변동을 보이지 않았다.
- (d) 열역학 엔트로피 수지의 경우, σ (13.8±0.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹)와 J(-10.4±0.5 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹)가 큰 변동 없이 생태계 내부에 생성된 열역학 엔트로피의 74-77%를 밖으로 수송해 냄으로써 생태계 내의 열역학 엔트로피 축적을 제어하는 일관성 있는 자기-조직화(|J/σ|= 0.76±0.01) 역량을 보였다.
- (2) 시험 기간(2011-2020 년) 동안에는 환경 요인을 비롯하여 복사, 에너지 및
 열역학 엔트로피 수지와 자기-조직화에 다양한 변화가 있었다.
 - (a) 환경 요인의 경우, 두 시험 기간에 걸쳐 PPT 의 지속적인 감소와 더불어 R_{s1}이 지속적으로 유의하게 증가한 반면, T_{air}, SWC, 그리고 VPD는 유의한 변화를 보이지 않거나 유의한 변화가 있어도 다시 기준상태 기간의 범위 내에 있었다.
 - (b) 복사 수지의 경우, R_{s↓}, R_{sn}, 그리고 알베도는 두 시험 기간에 걸쳐 지속적으로 유의하게 증가하였고, R_{l↓}의 소폭 증가와 R_{l↑}의 소폭 감소로 인해 R_{ln}의 크기가 유의하게 감소하였다. 그 결과, R_n는 두 시험 기간에 걸쳐 지속적으로 유의하게 증가하였다.
 - (c) 에너지 수지의 경우, LE는 R_n의 지속적인 증가에도 불구하고 첫번째 시험 기간에는 유의한 차이를 보이지 않고 두번째 시험 기간에는 유의하게 증가한 반면, H 는 첫번째 시험 기간에 유의하게 증가하였으나 두번째 시험 기간에는 기준상태 기간 수준으로 감소하였다. EBR은 첫번째 시험 기간에는 유의한 변화가 없었고, 두번째 시험 기간에 유의하게 감소하였다.
 - (d) 열역학 엔트로피 수지의 경우, σ는 두 시험 기간에 모두 유의하게
 증가하였다. J는 두 기간 모두 유의한 차이를 보이지 않았지만, σ와

J의 합인 dS/dt는 두 시험 기간 동안 모두 유의하게 증가하였다. 자기-조직화를 나타내는 |J/σ| 는 두번째 시험 기간에 유의하게 감소함으로써, GDK 의 온전성이 최근에 저하되고 있음을 보였다.

- (3) 온전성이 저하되는 원인을 구체적으로 살펴보기 위해
 - (a) 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들과의 관계를 살펴본 결과, R_n/R_{s↓} (즉 에너지 포획)과 생물량 대비 호흡량의 증가가 |J/σ| 의 감소와 음의 상관관계를 보였고, 교목의 종다양성의 감소는 양의 상관관계를 보였다.
 - (b) 자기-조직화를 결정하는 σ 와 J 각각의 30 분 단위 시계열 자료에서 정보 엔트로피(1)를 계산하여 불확정성의 변화를 살펴본 결과, 기준상태 기간에 비해 시험 기간 동안에 σ 와 J 의 불확정성이 증가(즉 자기-조직화(SO)가 감소)하였고, 그 증가폭은 σ 가 J 보다 더 컸다. 총체적인 자기-조직화를 나타내는 dS/dt (σ와 J의 합)의 30 분 단위 시계열 자료의 경우, 첫번째 시험 기간 동안에는 자기-조직화(SO)가 증가하면서 기준상태의 복잡성(C)이 유지되었으나, 두번째 시험 기간 동안에는 자기-조직화(SO)가 기준상태 기간보다 더 낮아졌고 복잡성(C)도 저하되었다. 자기-조직화 변화의 주 요인인 σ와 J의 상대적인 역할에 관하여, 열역학 엔트로피 기반의 결과와 정보 엔트로피 기반의 결과가 시사하는 바가 달랐으나, 총체적인 자기-조직화를 나타내는 IJ/σI, dS/dt, 그리고 dS/dt의 정보 엔트로피가 모두 생태계 온전성의 변화에 대한 일관성 있는 해석과 통찰력을 제공하였다.
 - (c) 종합적으로 GDK 에서 관측된 15 년 간의 환경 변화 및 생태계의 반응을 정리하면, |//σ|의 감소는 노령림인 GDK 에 유입 및 포획된 에너지의 증가로 인해 시스템 내의 σ가 증가한 반면, 이를 시스템

외부로 수송하는 J가 함께 증가하지 못한 결과였다. 강수량의 꾸준한 감소로 인한 태양에너지 유입의 지속적인 증가와 이에 대한 노령림의

자기-조직화 역량의 감소가 온전성 저하의 원인인 것으로 보인다.

결론적으로, 생태계의 자기-조직화의 변화를 기준상태의 그것과 비교함으로써 생태계의 온전성을 평가할 수 있다는 본 연구의 방법론과 GDK 를 사례로 보인 분석을 통해, GDK 의 온전성이 점차 저하되고 있음을 확인할 수 있었다. 자기-조직화를 정량화 하기 위해 비평형 열역학 기반의 엔트로피 수지를 분석할 때, 엔트로피 생성과 수송의 상대적인 비율(IJ/ơ)과 더불어 둘의 합인 순엔트로피(dS/dt)도 유용한 지표로 사용할 수 있었다. 또한 열역학 엔트로피의 시계열 자료가 충분할 경우, 정보 엔트로피를 함께 분석함으로써 열역학 기반의 자기-조직화의 정량화를 상호 보완할 수 있을 뿐만 아니라 정보 엔트로피 기반의 복잡성이 온전성의 또 다른 지표로 사용될 수 있음을 시사하였다.

현재 GDK 에서는 지속적인 환경의 변화로 인해 생태계 온전성이 저하되는 경향을 보이고 있기 때문에, 이에 대한 후속 조치와 관리를 어떻게 해야 할지 논의되어야 한다. 이를 위해서 앞으로도 지속적인 플럭스 모니터링을 통한 온전성 평가가 요구된다. 본 연구는 유네스코 BR 에 위치한 노령림인 GDK 를 대상으로 수행되었지만, 엔트로피 기반의 자기-조직화 정량화는 다른 노령림을 포함하여 임령과 수종이 다른 산림 뿐만 아니라 다양한 생태계에 적용하여 그 확장성과 유용성을 검증할 필요가 있다. 또한, GDK 와 같은 BR 의 핵심구역 뿐만 아니라 완충 및 전이구역에도 적용하여 생태-사회시스템의 온전성을 평가하는 데 적용할 수 있을 것이다. 이러한 후속 연구와 더불어(Appendix 9), 본 연구에 필요한 관측 자료를 제공한 KoFlux 네트워크와 같은 체계적인 장기 모니터링과 자료의 품질 관리가 지속된다면, 생태계 온전성의 정량적인 평가를 통해 '생물권 안에서 조화롭게 번영하는 사회'라는 BR 의 미션을 실현하는데 기여할 것으로 기대된다.

63

참고문헌

- Ahmad, N., Derrible, S., Eason, T., & Cabezas, H. (2016). Using fisher information to track stability in multivariate systems. *Royal Society Open Science*, 3(11), 160582. doi:doi:10.1098/rsos.160582
- Baumann, R. (2001). Indikation der selbstorganisationsfähigkeit terrestrischer ökosysteme. (Ph.D. dissertation). University of Kiel, Retrieved from https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00000467.
- Bland, L. M., Rowland, J. A., Regan, T. J., Keith, D. A., Murray, N. J., Lester, R.
 E., . . . Nicholson, E. (2018). Developing a standardized definition of ecosystem collapse for risk assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(1), 29-36. doi:10.1002/fee.1747
- Bridgewater, P., Kim, R. E., & Bosselmann, K. (2016). Ecological integrity: A relevant concept for international environmental law in the Anthropocene? *Yearbook of International Environmental Law, 25*(1), 61-78. doi:10.1093/yiel/yvv059
- Brunsell, N. A., Schymanski, S. J., & Kleidon, A. (2011). Quantifying the thermodynamic entropy budget of the land surface: Is this useful? *Earth System Dynamics*, 2(1), 87-103. doi:10.5194/esd-2-87-2011
- Bunn, S. E., & Davies, P. M. (2000). Biological processes in running waters and their implications for the assessment of ecological integrity. *Hydrobiologia*, 422(0), 61-70. doi:10.1023/A:1017075528625
- Burba, G. G., McDermitt, D. K., Grelle, A., Anderson, D. J., & Xu, L. (2008). Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology*, 14(8), 1854-1876. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01606.x
- Burkhard, B., & Müller, F. (2008). Indicating human-environmental system properties: Case study northern Fenno-Scandinavian reindeer herding. *Ecological Indicators*, 8(6), 828-840. doi:10.1016/j.ecolind.2007.06.003
- Burkhard, B., Opitz, S., Lenhart, H., Ahrendt, K., Garthe, S., Mendel, B., &Windhorst, W. (2011). Ecosystem based modeling and indication of ecological integrity in the German North Sea Case study offshore wind

 parks.
 Ecological
 Indicators,
 11(1),
 168-174.

 doi:10.1016/j.ecolind.2009.07.004

 </td

- Cabezas, H., & Eason, T. (2010). Fisher information and order. In San Luis Basin Sustainability Metrics Project: A Methodology for Assessing Regional Sustainability (pp. 163-222).
- Cairns, J. J. (1977). Quantification of biological integrity. In P. K. Ballentine & L. J. Guarraia (Eds.), *The integrity of the water*: US Goverment Printing Office.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *An introduction to environmental biophysics*. New York: Springer-Verlag.
- Chang, Y.-F. (2022). Entangled states, self-assembly, condensed matter physics and possible entropy decrease. *International Journal of Modern Applied Physics*, *12*(1), 1-15.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). The ecosystem concept. In *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. New York: Springer New York.
- Cho, Y.-C., Lee, H.-B., Kim, H.-G., Lee, D.-H., & Kim, H.-C. (2020). Annual report on Gwangneung forest and experimental forests 2019. Pocheon: Korea National Arboretum
- Cho, Y.-C., Shin, H.-C., Kim, S.-S., & Lee, C.-S. (2007). Dynamics and conservation of the Gwangneung national forest in central Korea: A national model for forest restoration. *Journal of Plant Biology*, 50(6), 615-625. doi:10.1007/BF03030604
- Cho, Y., Kim, H., Jung, S., Sim, H., Lee, D., Kim, J., . . . Kim, T. (2021). *Annual report on Gwangneung forest and experimental forests 2020*. Pocheon: Korea National Arboretum
- Cho, Y. C., Goo, B. Y., Shin, J. G., Kim, S. S., Park, K. W., Oh, S. H., & Lee, Y. M. (2012). *Changing environment and biodiversity in Gwangneung forest*. Pocheon: Korea National Arboretum
- Choi, T. J., Kim, J., & Yun, J. I. (1999). On using the eddy covariance method to study the interaction between agro-forest ecosystems and the atmosphere. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 1(1), 1-15.
- Choung, Y., Lee, J., Cho, S., & Noh, J. (2020). Review on the succession process of *Pinus densiflora* forests in South Korea: Progressive and disturbance-driven

succession. *Journal of Ecology and Environment, 44*(1), 16. doi:10.1186/s41610-020-00157-8

- Clipp, H. L., Brown, D. J., Rota, C. T., & Wood, P. B. (2022). Distinct forest bird communities are strongly associated with red spruce-northern hardwood ecosystems in Central Appalachia, USA. *Ecological Indicators*, 135, 108568. doi:10.1016/j.ecolind.2022.108568
- Clüsener-Godt, M. (2020). A message from the secretary of UNESCO's Man and the Biosphere (MAB) programme, Miguel Clüsener-Godt, on the COVID-19 crisis. Retrieved from https://en.unesco.org/news/message-secretaryunescos-man-and-biosphere-mab-programme-miguel-clusener-godt-covid-19-crisis
- De Leo, G. A., & Levin, S. (1997). The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation Ecology*, 1(1).
- Dorren, L. K. A., Berger, F., Imeson, A. C., Maier, B., & Rey, F. (2004). Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management*, 195(1), 165-176. doi:10.1016/j.foreco.2004.02.057
- Ebeling, W., & Schweitzer, F. (2002). Self-organization, active brownian dynamics, and biological applications. *Nova Acta Leopoldina NF, 88*(332), 169-188. doi:10.48550/arXiv.cond-mat/0211606
- ECCC. (2021). Canadian environmental sustainability indicators: Ecological integrity of national parks. Quebec: Environment and Climate Change Canada Retrieved from www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/ecological-integrity-national-parks.html.
- Eigenbrod, F., Gonzalez, P., Dash, J., & Steyl, I. (2015). Vulnerability of ecosystems to climate change moderated by habitat intactness. *Global Change Biology*, *21*(1), 275-286. doi:10.1111/gcb.12669
- Endres, R. G. (2017). Entropy production selects nonequilibrium states in multistable systems. *Scientific Reports*, 7(1), 14437. doi:10.1038/s41598-017-14485-8

- Equihua, M., Aldama, M. E., Gershenson, C., López-Corona, O., Munguía, M.,
 Pérez-Maqueo, O., & Ramírez-Carrillo, E. (2020). Ecosystem antifragility:
 Beyond integrity and resilience. *PeerJ*, 8, e8533. doi:10.7717/peerj.8533
- Eulenstein, F., Haberstock, W., Steinborn, W., Svirezhev, Y. U., Olejnik, J., Schlindwein, S. L., & Pomaz, V. (2003). Perspectives from energeticthermodynamic analysis of land use systems. *Archives of Agronomy and Soil Science, 49*(6), 663-676. doi:10.1080/03650340310001615138
- Faber-Langendoen, D., Lemly, J., Nichols, W., Rocchio, J., Walz, K., & Smyth, R. (2019). Development and evaluation of NatureServe's multi-metric ecological integrity assessment method for wetland ecosystems. *Ecological Indicators*, 104, 764-775. doi:10.1016/j.ecolind.2019.04.025
- Fath, B. D., Jørgensen, S. E., Patten, B. C., & Straškraba, M. (2004). Ecosystem growth and development. *Biosystems*, 77(1), 213-228. doi:10.1016/j.biosystems.2004.06.001
- Fernández, N., & Gershenson, C. (2014). Measuring complexity in an aquatic ecosystem. In L. F. Castillo, M. Cristancho, G. Isaza, A. Pinzón, & J. M. C. Rodríguez (Eds.), *Advances in computational biology*. Cham: Springer International Publishing.
- GFBRMC. (2021). UNESCO Gwangneung forest biosphere reserve. Retrieved from https://www.gfbr.kr/home/inc.php?inc=mab2
- Golley, F. (2000). Ecosystem structure. In S. E. Jørgensen & F. Müller (Eds.), Handbook of ecosystem theories and management. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Gyeonggi-do. (2020). Periodic review report of the Gwangneung forest biosphere reserve. Gyonggi-do: Gyeonggi Provincial Goverment
- Haase, P., Tonkin, J. D., Stoll, S., Burkhard, B., Frenzel, M., Geijzendorffer, I. R., ... Schmeller, D. S. (2018). The next generation of site-based long-term ecological monitoring: Linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *Science of The Total Environment*, 613-614, 1376-1384. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.111
- Halley, J. D., & Winkler, D. A. (2008). Consistent concepts of self-organization and self-assembly. *Complexity*, 14(2), 10-17. doi:10.1002/cplx.20235

- Hansen, A. J., Noble, B. P., Veneros, J., East, A., Goetz, S. J., Supples, C., ... Virnig,
 A. L. S. (2021). Toward monitoring forest ecosystem integrity within the post-2020 Global biodiversity framework. *Conservation Letters*, 14(4), e12822. doi:10.1111/conl.12822
- Hill, S. L. L., Fajardo, J., Maney, C., Harfoot, M., Harrison, M., Guaras, D., . . .
 Burgess, N. D. (2022). The ecosystem integrity index: A novel measure of terrestrial ecosystem integrity with global coverage. *bioRxiv*, 2022.2008.2021.504707. doi:10.1101/2022.08.21.504707
- Holdaway, R. J., Sparrow, A. D., & Coomes, D. A. (2010). Trends in entropy production during ecosystem development in the Amazon basin. 365(1545), 1437-1447. doi:doi:10.1098/rstb.2009.0298
- Imada, T. (2008). *Self-organization and society*. Tokyo: Springer Science & Business Media.
- Jax, K. (2005). Function and "functioning" in ecology: What does it mean? *Oikos, 111*(3), 641-648. doi:10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x
- Jungwirth, M., Muhar, S., & Schmutz, S. (2002). Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47(4), 867-887. doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00914.x
- Jørgensen, S. E. (2002). *Integration of ecosystem theories: A pattern* (3rd edition ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Jørgensen, S. E., Patten, B. C., & Straškraba, M. (2000). Ecosystems emerging: 4. Growth. *Ecological Modelling*, 126(2), 249-284. doi:10.1016/S0304-3800(00)00268-4
- Kandziora, M., Burkhard, B., & Müller, F. (2013). Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators - A theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators*, 28, 54-78. doi:10.1016/j.ecolind.2012.09.006
- Kang, M.-S., Kwon, H.-J., Lim, J.-H., & Kim, J. (2009). Understory evapotranspiration measured by eddy-covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests. *Korean Journal of Agricultural Forest and Meteorology*, 11(4), 233-246.

- Kang, M., Kim, J., Lee, S.-H., Kim, J., Chun, J.-H., & Cho, S. (2018). Changes and improvements of the standardized eddy covariance data processing in KoFlux. *Korean Journal of Agricultural Forest and Meteorology*, 20(1), 5-17.
- Kang, M., Kim, J., Yang, H., Lim, J.-H., Chun, J.-H., & Moon, M. (2019). On securing continuity of long-term observational eddy flux data: Field intercomparison between open-and enclosed-path gas analyzers. *Korean Journal of Agricultural Forest and Meteorology*, 21(3), 135-145.
- Kang, M., Ruddell, B. L., Cho, C., Chun, J., & Kim, J. (2017). Identifying CO₂ advection on a hill slope using information flow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 265-278. doi:10.1016/j.agrformet.2016.08.003
- Kang, M. S., Kim, J., Kim, H. S., Thakuri, B. M., & Chun, J. H. (2014). On the nighttime correction of CO₂ flux measured by eddy covariance over temperate forests in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 16(3), 233-245.
- Karr, J. (1996). *Ecological integrity and ecological health are not the same*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Karr, J. R., & Dudley, D. R. (1981). Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 5(1), 55-68. doi:10.1007/BF01866609
- Kay, J. (1991). A nonequilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity. *Environmental Management*, 15(4), 483-495.
- Kay, J. J., & Regier, H. A. (2000). Uncertainty, complexity, and ecological integrity: Insights from an ecosystem approach. In P. Crabbe, A. Holland, L. Ryszkowski, & L. Westra (Eds.), *Implementing ecological integrity*. Budapest: NATO Science Series.
- Kay, J. J., & Schneider, E. D. (1992). Thermodynamics and measures of ecological integrity. In D. H. McKenzie, D. E. Hyatt, & V. J. McDonald (Eds.), *Ecological indicators: Volume 1*. Boston, MA: Springer US.
- Keith, H., Czúcz, B., Jackson, B., Driver, A., Nicholson, E., & Maes, J. (2020). A conceptual framework and practical structure for implementing ecosystem condition accounts. *One Ecosystem*, 5, e58216. doi:10.3897/oneeco.5.e58216

- Kim, J., Lee, D., Hong, J., Kang, S., Kim, S.-J., Moon, S.-K., . . . Kim, S. (2006). HydroKorea and CarboKorea: Cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research*, 21(6), 881-889. doi:10.1007/s11284-006-0055-3
- Kim, J., & Yang, H. (2022). A comprehensive comparision: When transitioning from resilience to antifragility. In K. Go & C. Son (Eds.), *Pandemic, the responses* of cities. Seoul: The Seoul Institute.
- Kim, M.-S., Yun, S.-J., Park, C.-W., Choi, W.-I., Chun, J.-H., Lim, J.-H., & Bae, K.-H. (2021). Sequential changes in understory vegetation community for 15 years in the long-term ecological research site in Central temperate broad-leaved deciduous forest of Korea. *Korean Journal of Environment and and Ecology*, 35(3), 223-236.
- Kim, Y. (2010). The reason why Gwangneung forest was registered as a biosphere reserve. *Policy Briefing*. Retrieved from https://www.korea.kr/news/contributePolicyView.do?newsId=148695430
- Kleidon, A., & Schymanski, S. (2008). Thermodynamics and optimality of the water budget on land: A review. *35*(20). doi:10.1029/2008GL035393
- KNA. (2020a). Forest of Korea (V) Gwangneung forest in biosphere reserve. Pocheon: Korea National Arboretum
- KNA. (2020b). *Regular review report of the Gwangneung forest biosphere reserve*. Pocheon: Korea National Arboretum
- KNA, & Gyeonggi-do. (2009). Gwangneung forest biosphere reserve. Pocheon: Gyeonggi-do
- Kutsch, W. L., Steinborn, W., Herbst, M., Baumann, R., Barkmann, J., & Kappen, L. (2001). Environmental indication: A field test of an ecosystem approach to quantify biological self-organization. *Ecosystems*, 4(1), 49-66. doi:10.1007/s100210000059
- Kwon, H.-J. (2009). Estimation of net radiation in three different plant functional types in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11(2), 79-85.
- Lee, D.-H., Kim, J., Kim, S.-J., Moon, S.-K., Lee, J.-S., Lim, J.-H., . . . Kim, K.-H. (2007). Lessons from cross-scale studies of water and carbon cycles in the

Gwangneung forest catchment in a complex landscape of monsoon Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 9*(2), 149-160.

- Lee, H. (2011a). The estimation of climax index for deciduous tree species by ecomorphological factors. (Master thesis). Department of Forest Management, Graduate School, Kangwon National University,
- Lee, J.-S. (2011b). Monitoring soil respiration using an automatic operating chamber in a Gwangneung temperate deciduous forest. *Journal of Ecology and Environment, 34*(4), 411-423.
- Lewis, C. T. (1891). An elementary Latin dictionary. New York: Harper & Brothers.
- Lim, J.-H., Shin, J. H., Jin, G. Z., Chun, J. H., & Oh, J. S. (2003). Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 5(2), 101-109.
- Manuel-Navarrete, D., Kay, J. J., & Dolderman, D. (2004). Ecological integrity discourses: Linking ecology with cultural transformation. *Human Ecology Review*, *11*(3), 215-229.
- McCaughey, J. H., & Saxton, W. L. (1988). Energy balance storage terms in a mixed forest. Agricultural and Forest Meteorology, 44(1), 1-18. doi:10.1016/0168-1923(88)90029-9
- McGarigal, K., Compton, B. W., Plunkett, E. B., DeLuca, W. V., Grand, J., Ene, E., & Jackson, S. D. (2018). A landscape index of ecological integrity to inform landscape conservation. *Landscape Ecology*, 33(7), 1029-1048. doi:10.1007/s10980-018-0653-9
- Michel, D., Philipona, R., Ruckstuhl, C., Vogt, R., & Vuilleumier, L. (2008). Performance and uncertainty of CNR1 net radiometers during a one-year field comparison. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3), 442-451. doi:10.1175/2007JTECHA973.1
- Miller, P., & Rees, W. E. (2000). Introduction. In D. Pimentel, L. Westra, & R. F. Noss (Eds.), *Ecological integrity: Integrating environment, conservation, and health* (Vol. 31). Washington, DC: Island Press.

Mitchell, M. (2009). Complexity: A guided tour. New York: Oxford University Press.

- Müller, F. (2005). Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators*, 5(4), 280-294. doi:10.1016/j.ecolind.2005.03.017
- Müller, F., & Burkhard, B. (2007). An ecosystem based framework to link landscape structures, functions and services. In Ü. Mander, H. Wiggering, & K. Helming (Eds.), *Multifunctional land use: Meeting future demands for landscape goods and services*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Müller, F., Hoffmann-Kroll, R., & Wiggering, H. (2000). Indicating ecosystem integrity - Theoretical concepts and environmental requirements. *Ecological Modelling*, 130(1), 13-23. doi:10.1016/S0304-3800(00)00210-6
- Müller, F., & Windhorst, W. (2000). Ecosystems as functional entities. In S. E. Jørgensen & F. Müller (Eds.), Handbook of ecosystem theories and management. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Myster, R. W. (2001). What is ecosystem structure? *Caribbean Journal of Science*, *37*(12), 132-134.
- Naeem, S., Loreau, M., & Inchausti, P. (2004). Biodiversity and ecosystem functioning: The emergence of a synthetic ecological framework. In M. Loreau, S. Naeem, & P. Inchausti (Eds.), *Biodiversity and ecosystem functioning*. Oxford: Oxford University Press.
- Nielsen, S. N., Müller, F., Marques, J. C., Bastianoni, S., & Jørgensen, S. E. (2020). Thermodynamics in ecology - An introductory review. *Entropy*, 22(8), 820. doi:10.3390/e22080820
- NIFos. (2016). Gwangneung forest, the future of the forests that are twice the average of Korea. Seoul: National Institute of Forest Science Retrieved from https://north.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do;jsessionid= 2LEHLuVkat5SF5Y2NG4LfP1P6HNky0VvZ1SQCJa15SVIANe8pcqpjWs 0E9dmyGga.frswas01_servlet_engine5?nttId=3092840&bbsId=BBSMSTR _1036&pageUnit=10&pageIndex=87&searchtitle=title&searchcont=&searc hkey=&searchwriter=&searchWrd=&ctgryLrcls=CTGRY150&ctgryMdcls =&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=UKFR_03_03&orgId=kfri
- Nunneri, C., Windhorst, W., Kerry Turner, R., & Lenhart, H. (2007). Nutrient emission reduction scenarios in the North Sea: An abatement cost and

ecosystem integrity analysis. *Ecological Indicators*, 7(4), 776-792. doi:10.1016/j.ecolind.2006.09.002

- Odum, E. P. (1962). Relationships between structure and function in the ecosystem. Japanes Journal of Ecology 12(3), 108-118. doi:10.18960/seitai.12.3 108
- Park, C. W., Chun, J. H., Lim, J. H., Kim, S. H., Park, C. Y., Yang, H. M., (2018). A research on the establishment of foundation for forest long-term ecologial information and big data (2014-2018). Seoul: National Institute of Forest Science
- Park, P. S., & Oliver, C. D. (2015). Variability of stand structures and development in old-growth forests in the Pacific Northwest, USA. *Forests*, 6(9), 3177-3196. doi:10.3390/f6093177
- Parrish, J. D., Braun, D. P., & Unnasch, R. S. (2003). Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience*, 53(9), 851-860. doi:10.1641/0006-3568(2003)053[0851:AWCWWS]2.0.CO;2
- Peres, L. F., & DaCamara, C. C. (2005). Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8), 1834-1844. doi:10.1109/TGRS.2005.851172
- Plumptre, A. J., Baisero, D., Belote, R. T., Vázquez-Domínguez, E., Faurby, S., Jędrzejewski, W., . . . Boyd, C. (2021). Where might we find ecologically intact communities? *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. doi:10.3389/ffgc.2021.626635
- Prigogine, I. (1976). Order through fluctuation: Self-organization and social system. In E. Jantsch (Ed.), *Evolution and consciousness: Human systems in transition*: Addison-Wesley.
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. Retrieved from https://www.r-project.org/. from R Foundation for Statistical Computing https://www.r-project.org/
- Reed, M. G., & Massie, M. M. (2013). Embracing ecological learning and social learning: UNESCO biosphere reserves as exemplars of changing conservation practices. *Conservation and Society*, 11(4), 391-405. doi:10.4103/0972-4923.125755

- Regier, H. A. (1993). The notion of natrual and cultural integrity. In S. Woodley, J.Kay, & G. Francis (Eds.), *Ecological integrity and the management of ecosystems*. USA: St. Lucie press.
- Rempel, R. S., Naylor, B. J., Elkie, P. C., Baker, J., Churcher, J., & Gluck, M. J. (2016). An indicator system to assess ecological integrity of managed forests. *Ecological Indicators*, 60, 860-869. doi:10.1016/j.ecolind.2015.08.033
- Roche, P. K., & Campagne, C. S. (2017). From ecosystem integrity to ecosystem condition: A continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29, 63-68. doi:10.1016/j.cosust.2017.12.009
- Rohwer, Y., & Marris, E. (2021). Ecosystem integrity is neither real nor valuable. 3(4), e411. doi:10.1111/csp2.411
- Ruaro, R., & Gubiani, É. (2013). A scientometric assessment of 30 years of the index of biotic integrity in aquatic ecosystems: Applications and main flaws. *Ecological Indicators*, 29, 105–110. doi:10.1016/j.ecolind.2012.12.016
- Ruddell, B. L., & Kumar, P. (2009). Ecohydrologic process networks: 1. Identification. Water Resources Research, 45(3). doi:10.1029/2008WR007279
- Santamaría-Bonfil, G., Fernández, N., & Gershenson, C. (2016). Measuring the complexity of continuous distributions. *18*(3), 72. doi:10.3390/e18030072
- Santamaría-Bonfil, G., Gershenson, C., & Fernández, N. (2017). A package for measuring emergence, self-organization, and complexity based on Shannon entropy. *Frontiers in Robotics and AI*, 4(10). doi:10.3389/frobt.2017.00010
- Schallenberg, M., David-Kelly, D., Clapcott, J., Death, R., Macnei, C., & Young, R.
 (2011). Approaches to assessing ecological integrity of New Zealand freshwaters. New Zealand: Department of Conservation
- Schneider, E. D., & Kay, J. J. (1994a). Complexity and thermodynamics: Towards a new ecology. *Futures*, 26(6), 626-647. doi:10.1016/0016-3287(94)90034-5
- Schneider, E. D., & Kay, J. J. (1994b). Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Mathematical and Computer Modelling*, 19(6), 25-48. doi:10.1016/0895-7177(94)90188-0

- Schowalter, T. D. (2011). 11 Ecosystem structure and function. In T. D. Schowalter (Ed.), *Insect ecology (Third edition)*. San Diego: Academic Press.
- Schrödinger, E. (1944). *What is life? The physical aspect of the living cell and mind.* New York: Cambridge University Press Cambridge.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Shedekar, V. S., King, K. W., Fausey, N. R., Soboyejo, A. B. O., Harmel, R. D., & Brown, L. C. (2016). Assessment of measurement errors and dynamic calibration methods for three different tipping bucket rain gauges. *Atmospheric Research, 178-179*, 445-458. doi:10.1016/j.atmosres.2016.04.016

- Shi, Y., Wang, N., Li, T., Wang, H., Kang, H., & Shi, X. (2018). Evaluation of landscape ecological integrity in the Yulin region, China. *Sustainability*, 10(11). doi:10.3390/su10114300
- Song, Y., & Ryu, Y. (2015). Seasonal changes in vertical canopy structure in a temperate broadleaved forest in Korea. *Ecological Research*, 30(5), 821-831. doi:10.1007/s11284-015-1281-3
- Steinborn, W., & Svirezhev, Y. (2000). Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, 133(3), 247-257. doi:10.1016/S0304-3800(00)00323-9
- Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, *16*(3), 284-307. doi:10.2307/1930070
- Theobald, D. M. (2013). A general model to quantify ecological integrity for landscape assessments and US application. *Landscape Ecology, 28*(10), 1859-1874. doi:10.1007/s10980-013-9941-6
- Tierney, G. L., Faber-Langendoen, D., Mitchell, B. R., Shriver, W. G., & Gibbs, J. P. (2009). Monitoring and evaluating the ecological integrity of forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(6), 308-316. doi:10.1890/070176
- Ulanowicz, R. E. (2000). Toward the measurement of ecological integrity. In D. Pimentel, L. Westra, & R. F. Noss (Eds.), *Ecological integrity: Integrating environment, conservation, and health.* Washington, DC.: Island Press.

- UNESCO. (1974). Task force on: Criteria and guidelines for the choice and establishment of biosphere reserves. Paris: UNESCO and UNEP
- UNESCO. (1983). *Guidelines for identification, evaluation and selection of biosphere reserves in the United States*. Washington, D.C.: U.S. Man and the Biosphere Progam
- UNESCO. (1996). Biosphere reserves The Seville strategy and the statutory framework of the world network. Paris: UNESCO
- UNESCO. (2000). Biosphere reserves: Special places for people and nature. Paris: UNESCO
- UNESCO. (2002). Recent developments on BRIM (Biosphere Reserve Integrated Monitoring Programme). Retrieved from Paris: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000120107?1=null&queryId=433 0bd97-7257-4a76-8798-fb53f2a181e3
- UNESCO. (2023). Biosphere reserves. Retrieved from https://en.unesco.org/biosphere
- Vaisala. (2009). *User's guide Humidity and temperature probe HMP155*. Retrieved from Finland:
- Varble, J. L., & Chávez, J. L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management, 101*(1), 93-106. doi:10.1016/j.agwat.2011.09.007
- WCS. (2020). FAQ: Ecosystem integrity in the post-2020 Global biodiversity framework. Wildlife Conservation Society Retrieved from https://s3.amazonaws.com/cbddocumentspublic-imagebucket-15w2zyxk3prl8/81430964792db0477d42ccf6d4c4691f
- Wells, R. W., Lertzman, K. P., & Saunders, S. C. (1998). Old-growth definitions for the forests of British Columbia, Canada. *Natural Areas Journal*, 18(4), 279-292.
- Westra, L., Miller, P., Karr, J., Rees, W., & Ulanowicz, R. (2000). Ecological integrity and the aims of the global integrity project. In D. Pimemtel, L. Westra, & R. F. Noss (Eds.), *Ecological integrity: Integrating environment, conservation, and health.* Washington, DC: Island Press.

- WHC. (2019). Operational guidelines for the implementation of the World heritage convention. Paris: UNESCO World Heritage Centre
- Wiersema, A. (2008). A train without tracks: Rethinking the place of law and goals in environmental and natural resources law. *Environmental Law, 38*, 1239.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., . . . Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural* and Forest Meteorology, 113(1), 223-243. doi:10.1016/S0168-1923(02)00109-0
- Wilson, K. B., & Baldocchi, D. D. (2000). Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. Agricultural and Forest Meteorology, 100(1), 1-18. doi:10.1016/S0168-1923(99)00088-X
- Wirth, C., Messier, C., Bergeron, Y., Frank, D., & Fankhänel, A. (2009). Old-growth forest definitions: A pragmatic view. In C. Wirth, G. Gleixner, & M. Heimann (Eds.), *Old-Growth Forests*. Heidelberg: Springer.
- Woodley, S. (1993). Monitoring and measuring ecosystem integrity in Canadian national parks. In S. Woodley, J. Kay, & G. Francis (Eds.), *Ecological integrity and the management of ecosystems*. Boca Raton: CRC Press.
- Yang, H., Indrawati, Y., Suyker, A., Lee, J.-J., Lee, K., & Kim, J. (2020). Radiation, energy, and entropy exchange in an irrigated-maize agroecosystem in Nebraska, USA. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 22(1), 26-46.
- Yang, H., Kang, M., Kim, J., Ryu, D., Kim, S.-J., Chun, J.-H., . . . Yun, S. J. (2021). The dynamics of CO₂ budget in Gwangneung deciduous old-growth forest: Lessons from the 15 years of monitoring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 23(4), 198-221.
- Yoo, J., Lee, D., Hong, J., & Kim, J. (2009). Principles and applications of multilevel H₂O/CO₂ profile measurement system. *Korean Journal of Agricultural* and Forest Meteorology, 11(1), 27-38.
- Yun, J., Kang, M., Kim, S., Chun, J. H., Cho, C.-H., & Kim, J. (2014). How is the process network organized and when does it show emergent properties in a forest ecosystem? In A. Sanayei, I. Zelinka, & O. E. Rössler (Eds.), *ISCS*

2013: Interdisciplinary Symposium on Complex Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Zeileis, A., Lumley, T., Graham, N., & Koel, S. (2022). Sandwich: Robust covariance matrix estimators. Retrieved from https://sandwich.r-forge.r-project.org/. https://sandwich.r-forge.r-project.org/
- Zelnik, Y. R., Mau, Y., Shachak, M., & Meron, E. (2021). High-integrity human intervention in ecosystems: Tracking self-organization modes. *PLOS Computational Biology*, 17(9), e1009427. doi:10.1371/journal.pcbi.1009427

부록

Appendix 1. 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수

선행연구들은 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들의 집합으로 생태계 온전성을 평가하였다(Kandziora et al., 2013; Kutsch et al., 2001; Müller, 2005; Müller et al., 2000). 제안된 상태변수로는 하향단파복사대비 순복사(i.e., 에너지 포획), 호흡량(i.e., 에너지 소산), 생물량(i.e., 에너지 저장), 생물량 대비 호흡량, 증발산 대비 증산, 양분 용탈, 생물다양성 등이 있다. 그 중에서 하향단파복사 대비 순복사, 호흡량, 생물량, 증발산 대비 증산, 생물다양성은 생태계의 자기-조직화 역량과 양의 상관관계에, 생물량 대비 호흡량과 양분 용탈은 음의 상관관계를 보인다고 간주하고 각각에 동일한 가중치를 부여해서 생태계 온전성을 평가하였다(Table A1). 예를 들어, Kutsch et al. (2001)는 유럽의 산림과 과거 산림이었으나 경작되 인접한 지역의 옥수수 밭 생태계 온전성을 비교하였다. 현장조사를 기반으로 8 가지 상태변수들을 정량화한 결과, 산림은 옥수수 밭에 비해 생물다양성, 생물량, 증발산 대비 증산, 양분 순환이 높고, 생물량 대비 호흡량이 낮아서 전반적으로 산림의 생태계 온전성이 더 높았다고 평가하였다. Müller and Burkhard (2007)은 습지 생태계가 농지로 전환되는 교란을 모델링한 결과를 기반으로 생태계 온전성을 비교하였다. 8가지 상태변수들을 분석한 결과, 습지가 교란될수록 생물다양성, 증발산 대비 증산, 생물량은 줄어들고, 양분 용탈과 생물량 대비 호흡량은 증가하여 생태계 온전성이 저하되었다고 평가하였다.

모든 상태변수가 일관된 변화를 보여서 생태계 온전성 평가가 수월했던 앞선 두 연구와 달리, 다른 연구들은 상태변수들이 일관되지 않은 변화를 보여서 생태계가 온전한지 아닌지 평가하는데 어려움이 있었다. 예를 들어, Burkhard and Müller (2008)는 북유럽 지역의 순록 떼 밀도를 다르게 한 초원 생태계의 모델링 결과를 기반으로 정량화가 가능한 7가지 상태변수들을 비교하였다. 그 결과 순록 떼를 많이 키울수록 과도한 초식 및 피압으로 인해 퇴행천이가 일어나서 호흡량, 생물량, 증발산 대비 증산, 생물량 대비 호흡량은 감소한 반면, 하향단파복사 대비 순복사와 비생물다양성은 오히려 증가하였다. 서로 상반된 상태변수들의 변화로 인해 순록 떼 밀도에 따른 생태계 온전성 변화에 대한 결론을 내리기는 어려웠고, 대신 이해관계자들이 순록 떼 변화가 전체 생태계 온전성을 해치지 않을 정도로 관리할 책임이 있음을 강조하였다. Burkhard *et al.* (2011)은 모델링한 7 가지 상태변수들을 기반으로 유럽 북해의 해양공원을 건설하기 전, 도중, 후의 생태계 온전성을 비교하였다. 에너지 포획과 양분 순환은 건설 후에 민감하게 줄어들었다가 회복되었고, 생물다양성은 회복되지 않았으나 나머지 상태변수들은 예상과 달리 민감하게 변하지 않았다. 그들 역시 상태변수들의 일관되지 않은 변화로 인해 해양공원 건설이 생태계 온전성에 미치는 영향에 대한 결론을 내리기는 어려웠다.

이처럼 자기-조직화와 관련되어 있다고 제안된 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들의 집합으로 생태계 온전성을 평가하는 기존의 방식에는 다음의 한계가 발견되었다: (1) 상태변수들마다 동일한 가중치를 두었기 때문에, 모든 상태변수들이 일관되게 증가하거나 감소하는 변화를 보이지 않은 경우는 하나의 통합된 생태계 온전성으로서 결론 내리기 어려웠다. (2) 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들은 생태계의 자기-조직화 역량과 예상되는 관계를 보이지 않을 때도 많았다. (3) 대부분의 연구들은 모델링 데이터에 의존하였기에 실제 관측한 데이터를 가지고 평가한 사례는 드물었다. (4) 선행연구들은 서로 다른 생태계끼리 비교하기 위해 한 시점에만 초점을 맞추었기 때문에, 하나의 시스템에서 장기 관측한 생태계 온전성에 대한 연구는 부족하였다.

이와 대조적으로, 본 연구는 생태계의 자기-조직화 역량을 하나의 총체적인 지표로 정량화하여 생태계 온전성을 평가할 수 있었다. 또한 실제 관측한 장기 자료를 기반으로, 동일한 생태계에서 시간에 따른 자기-조직화 역량의 변화를 정량화하여 생태계 온전성의 장기적인 변화를 추적할 수 있었다.

| State | e variables | Indicators | | | | | | | | |
|-----------|--|-----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|
| Tuna | Studies | Kutsch et al. (2001) | Müller and Burkhard (2007) | Burkhard and Müller (2008) | Burkhard et al. (2011) | | | | | |
| Турс | Target ecosystem | Beech forest vs. Maize field | Wetland degradation scenario | Reindeer herding scenario | Marine construction scenario | | | | | |
| | Energy Capture Net radiation/Net shortwave radiation | | Net primary production | Aboveground plant biomass | Net primary production | | | | | |
| | Energy Dissipation (Surface temperature) ⁻¹ | | Soil respiration | Soil respiration | Respiration | | | | | |
| Function | Energy Storage Total biomass | | Carbon balance | Soil organic carbon content | Carbon stored in biomass | | | | | |
| | Respiration/ Biomass | Ecosystem respiration/ Biomass | Soil respiration/ Net primary production | Soil respiration/ Biomass | NA | | | | | |
| | Transpiration/Transpiration/EvapotranspirationEvapotranspiration | | Transpiration/Interception/EvapotranspirationEvapotranspiration | | NA | | | | | |
| | Nutrient leaching NA | | Nitrate leaching | Nitrate leaching | Transport loss of nutrient | | | | | |
| Structure | Diversity | Species number | Species richness | Number of plant species | Seabirds diversity | | | | | |

Table A1. State variables that were used for assessment of ecosystem integrity by previous studies

Appendix 2. 광릉숲이 유네스코 생물권보전지역으로 등재된 이유

광릉숲이 유네스코 생물권보전지역(Biosphere Reserve, BR)으로 등재된 이유는 다음과 같다(Table A2). 먼저, 광릉숲이 조선시대부터 세조 왕릉으로 지정되어 보전되어 왔고 550 년 이상 큰 화재나 인위적인 개발 등의 교란을 겪지 않아, 보기 드문 온대북부지역의 천이 후기 산림으로 남아있기 때문이다. 또한 노령림의 복잡한 구조와 하천 생태계와의 연결성으로 인해 한반도에서 단위면적당 가장 많은 생물종이 서식하고 있다는 점도 중요한 이유였다(Cho *et al.*, 2007; GFBRMC, 2021; KNA & Gyeonggi-do, 2009). 이에 더해 조선왕릉이라는 독특한 문화적 가치를 갖고 있으며, 책임연구기관인 국립수목원이 광릉숲의 교육·연구· 모니터링을 담당하고 있기에 등재될 수 있었다(Kim, 2010). 광릉숲은 BR 로 등재된 2010 년으로부터 10 년 뒤에 시행된 첫번째 정기평가에서도 BR 유지 기준을 통과하였다. 이는 꾸준한 생태계 모니터링 활동을 통한 생물상 업데이트, 광릉숲 BR 관리 전담 센터의 설립, 생태교육 프로그램, 지역 축제 활성화 등의 성과를 인정받은 결과였다(Gyeonggi-do, 2020). Table A2. Reasons that Gwangneung forest was designated and maintained as an UNESCO Biosphere Reserve (GFBRMC, 2021; Gyeonggi-do, 2020; KNA & Gyeonggi-do, 2009)

| No | Reasons that Gwangneung forest was designated and maintained | | | | | | | |
|------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| INU. | as an UNESCO Biosphere Reserve | | | | | | | |
| | Gwangneung forest is a late successional temperate deciduous forest, which is | | | | | | | |
| 1 | representative of the temperate and sub-polar broadleaved forest. Gwangneung forest | | | | | | | |
| | biosphere reserve (GFBR) gradually includes well-preserved natural forests, artificial | | | | | | | |
| | planted forests, and areas where villagers live, farm, and engage in tourism. | | | | | | | |
| | GFBR has a significance for biodiversity conservation, because it has the largest | | | | | | | |
| 2 | number of species per unit area in Korea. The total number of species in GFBR was | | | | | | | |
| | 4,456 in 2010; and it was updated to 6,270 after additional monitoring in 2020. | | | | | | | |
| | Related organizations and local residents of the GFBR have demonstrated regional | | | | | | | |
| | sustainable development approaches (e.g., increase of forest product income, local | | | | | | | |
| 2 | special food development, eco-experience village operation, local brand development, | | | | | | | |
| 3 | tourism revitalization, and incentives for public transportation users). As a result, local | | | | | | | |
| | income increased, local festivals were activated, and the number of visitors in GFBR | | | | | | | |
| | increased. | | | | | | | |
| | GFBR has an appropriate size to serve the three functions of biosphere reserve | | | | | | | |
| | (conservation, logistic support, and development; total area: 24,465 ha): | | | | | | | |
| | (a) conservation: size of core zone is 755 ha (3%), which includes the | | | | | | | |
| | Gwangneung Deciduous old-growth forest in Korea (GDK) which has been | | | | | | | |
| 4 | strictly preserved since Joseon dynasty. | | | | | | | |
| | (b) logistic support: size of buffer zone is 1,656 ha (7%), which surrounds the | | | | | | | |
| | core zone, buffering the effects of transition area. | | | | | | | |
| | (c) development: size of transition zone is 22,053 ha (90%), which can serve the | | | | | | | |
| | sustainable economic development of local residents. | | | | | | | |
| | GFBR includes these functions through appropriate zonation, recognizing: | | | | | | | |
| | (a) core zone: it includes the GDK and its biodiversity is the largest in Korea | | | | | | | |
| | (local residents: none) | | | | | | | |
| | (b) buffer zone: it surrounds the core zone and includes artificial planted forests | | | | | | | |
| | and experimental forests, where Korean National Arboretum supports | | | | | | | |
| 5 | monitoring, education, training, and research (local residents in 2010 and | | | | | | | |
| | 2019: ~150 people). | | | | | | | |
| | (c) transition zone: it is used as a residence, farmland, private forest, eco- | | | | | | | |
| | experience village, and other purposes for local residents. It is an area where | | | | | | | |
| | local resources are managed and worked together for sustainable economic | | | | | | | |
| | development (local residents in 2010: ~80,000 people; however, it reduced | | | | | | | |
| | due to population loss and aging in 2019: ~70,000 people). | | | | | | | |
| | A GFBR center was established as an organizational arrangement that can coordinate | | | | | | | |
| (| the participation and opinions of stakeholders in GFBR. Together with this GFBR | | | | | | | |
| 0 | A charactery) local comparison (cyclic densidents' compatible of densi | | | | | | | |
| | Arboretum), local communicates (called residents council), and civilians | | | | | | | |
| | (environmental civic grounds) are participating in GFKB. | | | | | | | |
| 7 | In audition, provisions have been made for: (a) maskenieme to menore human use and estimities in the huffer $x = 1$ | | | | | | | |
| / | (a) mechanisms to manage numan use and activities in the buffer zone: Korea | | | | | | | |
| | Inational Arboretum limits the daily visitors in the buffer zone. Development | | | | | | | |

in the buffer zone is only possible after passing an environmental impact assessment. GFBR center restrains unrestricted development in the buffer zone.

- (b) a management policy or plan for these areas as a Biosphere Reserve:
 'Gyeonggi-do Biosphere Reserve Ordinance' was enacted as a management policy. In addition, the GFBR center establishes a management plan on a regular basis every five years.
- (c) a designated authority or mechanism to implement this policy or plan: The GFBR center establishes a business plan for operation and management every year and executes it.
- (d) programs for research, monitoring, education, and training: A national research institute – Korean National Arboretum – provides a variety of education and training programs (e.g., age class, social class, short-term, and long-term ecological education) as well as ecosystem research and monitoring.

Appendix 3. 지중열 계산

에너지 및 열역학 엔트로피 수지를 계산하기 위해서는 지표에서의 지중열 플럭스(ground heat flux, *G*)가 필요하다. 그러나 지중열 관측기기(HFP01-L, Campbell Scientific, Inc.)는 복사에 노출되면 안되므로, 실제로는 토양 깊이 *z* (m)만큼 매설되어 관측한다. 따라서 깊이 *z* (m)에서 관측된 지중열 플럭스에 깊이 *z* (m)에서 지표까지 저장된 지중 저류항을 추가적으로 더하여, 지표에서의 지중열 플럭스로 변환해줘야 한다(McCaughey & Saxton, 1988):

$$G(0) = G(z) + C_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t} z \qquad (\stackrel{\text{A}}{\to} A1)$$

여기서 *G*(0)는 지표에서의 지중열 플럭스, *G*(*z*)는 깊이 *z*(m)에서 관측된 지중열 플럭스이며 단위는 W m⁻²이다. 생태계에서 토양으로 들어오는 플럭스의 기호는 양수이며, 토양에서 생태계로 방출되면 음수이다. *T_s* 는 지중열 관측기기 위의 평균 토양 온도로 단위는 K 이다. *t* 는 관측 시간이며 본 연구에서는 Δ*t* = 1,800 초이다. *C_s*는 토양 열용량으로 단위는 J m⁻³ K⁻¹ 이며 다음과 같이 계산된다:

$$C_s = \rho_b c_{sd} + \theta_v c_{sw} \tag{4A2}$$

여기서 ρ_b는 토양 밀도이며 단위는 kg m⁻³이다. GDK 에서 보고된 깊이 0-0.05 m 의 토양 밀도인 0.86 kg m⁻³을 사용하였다(Lee, 2011b). c_{sd}와 c_{sw}는 각각 건조 토양(c_{sd} = 890 J kg⁻¹ K⁻¹)과 토양 공극수(c_{sw}= 4,190 J kg⁻¹ K⁻¹)의 비열이다. θ_v는 토양수분함량으로 단위는 m³ m⁻³이다.

Appendix 4. 생물량 저류항 계산

생물량 저류항은 다음과 같이 계산할 수 있다(McCaughey & Saxton, 1988):

$$B = m_{veg} c_{veg} \frac{\Delta T_{veg}}{\Delta t} \tag{A3}$$

여기서 *B*는 목본에 저장되는 생물량 저류항이며 단위는 W m⁻²이다. 생태계에서 식생으로 들어오는 플럭스의 기호는 양수이며, 식생에서 방출되면 음수이다. *m_{veg}*는 단위면적당 목본의 생물량이며 단위는 kg m⁻²이다. *c_{veg}*는 식생의 비열로 온대 낙엽활엽수림의 비열인 3,340 J kg⁻¹ K⁻¹을 사용하였다(Wilson & Baldocchi, 2000). *T_{veg}*는 식생의 온도이며 단위는 K 이다. 본 연구에서는 GDK 플럭스 타워의 프로파일 시스템에서 관측된 기온 중에 식생의 높이와 겹치는 지상으로부터 1, 3, 10, 15 m 높이의 기온의 평균을 식생의 온도라고 간주하였다. *t* 는 관측 시간이며 본 연구에서는 Δ*t* = 1,800 초이다. 산림의 다양한 수종, 재질, 크기, 방향 등에 따른 차이는 무시할 만하다고 가정하였다.

Appendix 5. 환경 요인, 복사, 에디-공분산 플럭스 자료의 불확도

| Data | | Instrument | Uncertainty (%) | Reference | |
|--------------------------|------------------------|---|----------------------|----------------------------------|--|
| | PPT | Tipping bucket rain gauge (TR-525, Campbell Scientific Inc.) | 14 | Shedekar <i>et al.</i> (2016) | |
| | $R_{s\downarrow}$ | Net radiometer (CNR1, Kipp & Zonen) | 1–9 | Michel et al. (2008) | |
| Environmental factors | T _{air} | Humidity and temperature probe (HMP155, Vaisala Oyj) | 1–3 (at −30~50 ℃) | Vaisala (2009) | |
| | SWC | Time domain reflectometer (CS616/625, Campbell Scientific Inc.) | 4–6 (Loamy sand) | Varble and Chávez (2011) | |
| | $R_{s\uparrow}$ | | 5–10 | | |
| Dediction | $R_{l\downarrow}$ | Net radiometer | 1–2 | - Michal et al. (2008) | |
| Kadiation | $R_{l\uparrow}$ | Zonen) | ~1 | - Michel <i>et al.</i> (2008) | |
| | R _n | | 4–23 | | |
| Eddy- | LE | Closed-path infrared | 14–19 | | |
| covariance | Н | gas analyzer (EC155, Campbell | 17–22 | Kang <i>et al.</i> (2018) | |
| IIux | <i>CO</i> ₂ | Scientific, Inc.) | 17–18 | | |

Table A3. Data uncertainty of environmental factors, radiation, and eddy-covariance flux

Appendix 6. GDK 의 주변 기상관측소에서 관측한 환경 요인

Table A4. Environmental factors averaged from GDK's nearby meteorological stations (Seoul, Dongducheon, and Yangpyeong): precipitation (*PPT*), incoming shortwave radiation (Rs_{\downarrow}), air temperature (T_{air}). (SD is standard deviation. Dif (%) is the difference of means between reference state period and each test period. Values exceeding the range of the reference state period are indicated in bold.)

| Veen | PPT | Rs_{\downarrow} | T _{air} |
|--------------|-------|--------------------|------------------|
| Tear — | mm | MJ m ⁻² | Ĉ |
| 2006 | 1,571 | 4,341 | 10.1 |
| 2007 | 1,300 | 4,160 | 10.4 |
| 2008 | 1,432 | 4,572 | 10.1 |
| 2009 | 1,556 | 4,855 | 10.1 |
| 2010 | 1,962 | 4,497 | 9.4 |
| Mean | 1,564 | 4,485 | 10.0 |
| SD | 248 | 260 | 0.3 |
| 2011 | 2,183 | 4,586 | 9.3 |
| 2012 | 1,521 | 4,346 | 9.5 |
| 2013 | 1,519 | 4,295 | 9.8 |
| 2014 | 780 | 4,314 | 10.6 |
| 2015 | 861 | 4,621 | 10.9 |
| Mean | 1,373 | 4,432 | 10.0 |
| SD | 573 | 158 | 0.7 |
| Dif (%) | -12 | -1 | 0 |
| 2016 | 1,005 | 4,531 | 11.0 |
| 2017 | 1,137 | 4,542 | 10.3 |
| 2018 | 1,380 | 5,063 | 10.2 |
| 2019 | 986 | 5,108 | 10.7 |
| 2020 | 1,553 | 5,116 | 10.5 |
| Mean | 1,212 | 4,854 | 10.5 |
| SD | 247 | 292 | 0.3 |
| Dif (%) | -23 | 8 | 5 |
| Mean (15 yr) | 1,383 | 4,591 | 10.2 |
| SD (15 yr) | 389 | 298 | 0.5 |

Appendix 7. 정보 엔트로피 계산

정보 이론은 드물게 일어나는 사건은 자주 발생하는 사건보다 정보량이 높다는 아이디어를 수학적으로 표현한 이론이다(Shannon, 1948). 예를 들어, 질서 정연한 조직적인 시계열은 무질서한 시계열보다 불확정성(indeterminacy)인 정보 엔트로피(information entropy)가 낮다. 즉, 낮은 정보 엔트로피는 높은 자기-조직화 역량을 의미한다.

Fernández and Gershenson (2014)은 시계열 자료의 불확정성/무질서를 정보 엔트로피(information entropy, *I*)로 나타내고 창발성(emergence, *E*)을 의미한다고 보았다. 그 반대인 확정성/질서는 정보 엔트로피의 감소로 나타내고 자기-조직화(self-organization, *SO*)를 의미한다고 제안하였다. 이 둘 사이의 균형은 복잡성(complexity, *C*)이다.

I는 과정이나 스케일의 변화의 결과로 발생하는 비결정성 및 불확정성을
측정하며(Kim & Yang, 2022), 다음과 같이 계산된다(Santamaría-Bonfil *et al.*, 2016):

$$I = E = -K \sum_{i=1}^{N} p_i \log_2 p_i \qquad (A A A)$$

여기서 *p_i* 는 사건 *i* 가 일어날 확률이다. *K* 는 *I* 를 0 ≤ *I* ≤ 1 사이의 범위로 제한하는 정규화 상수이며 다음과 같이 계산된다:

$$K = 1/\log_2(b) \tag{4A5}$$

여기서 b는 P(x_i) > 0를 만족하는 상태이다. 따라서 log₂(b)는 시스템이 취할 수 있는 가능한 상태의 수 b를 갖는 분포 함수에 대한 최대 엔트로피에 해당된다. 완전히 무작위적인 시계열(e.g., 모든 사건이 일어날 확률이 똑같은 균일한 분포일 때)은 가장 높은 I(=1)를 가지는 반면, 완전히 결정적인 시계열(e.g., 반드시 특정 사건만 일어나는 분포일 때)은 가장 낮은 I(=0)를 가진다. 한편, *SO*는 과정이나 스케일의 변화와 연관된 질서 및 규칙성과 관련이 있다(Kim & Yang, 2022). 완전히 무작위적인 시계열은 가장 낮은 *SO*(=0)를 가지는 반면, 완전히 결정적인 시계열은 가장 높은 *SO*(=1)를 가진다. 이런 측면에서 *SO*는 정보 엔트로피의 감소로 볼 수 있다. 따라서 *SO*는 *I*(= *E*)와 보상적인 관계이며, 식 A6과 같이 표현되고 범위는 0 ≤ *SO* ≤ 1이다:

$$SO = 1 - I \qquad (\overset{\text{A}}{\rightharpoonup} A6)$$

C 는 끊임없는 불확정성 증가와 감소의 상호작용을 통해 만들어지는 동적 평형 상태를 의미한다(Equihua *et al.*, 2020; Kim & Yang, 2022). 즉, *C*는 *I*와 *SO*의 균형이므로 식 A7 과 같이 표현된다. 단, 범위를 0 ≤ *C* ≤ 1 사이의 범위로 제한하기 위해 정규화 상수인 4 를 곱하였다. *C*는 *I* = *SO* = 0.5 일 때만 최대인 1 이 되며, *I* = 0 이며 *SO* = 1 일 때 또는 *I* = 1 이며 *SO* = 0 일 때에 최소인 0 이 된다.

$$C = 4 \cdot I \cdot SO \tag{(4) A7}$$

GDK 의 열역학 엔트로피 수지인 σ 와 J의 시계열 자료의 정보 엔트로피를 계산하기 위해, Santamaría-Bonfil *et al.* (2017)에서 제안한 MATLAB 코드의 *DiscreteComplexityMeasures* 기능을 사용하여 σ의 정보 엔트로피(*I_σ*)와 J의 정보 엔트로피(*I_J*)를 정량화 하였다. 입력 매개변수인 *pmfSample* 에는 강건한 계산 결과를 위한 충분한 자료 개수를 확보하기 위해(Appendix 8), 30 분 단위 시계열 자료(매년 17,520–17,568 개)를 사용하였다. 또 다른 매개변수인 *noOfStates* 에는 선행연구들이 디폴트 값으로 삼은 10 을 입력하여, 시계열 데이터를 10 개의 구간으로 나누고 각 구간의 확률 분포를 구하였다.

Appendix 8. 자료 개수에 따른 정보 엔트로피의 민감도 테스트

Santamaría-Bonfil *et al.* (2017)이 제안한 MATLAB 코드로 자료 개수에 따른 정보 엔트로피, 곧 불확정성의 민감도를 테스트 하였다. 이를 위해 GDK 에서 2006 년부터 2020 년까지 계산된 σ와 J의 30 분 단위 시계열 자료를 사용하였다.

자료 개수에 따른 민감도는 30 분 단위 시계열 자료에서 샘플링 간격을 다르게 한 자료로 테스트하였다. 예를 들어 30 분 단위 시계열 자료 중에 n 번째 자료를 샘플링해서 자료 개수를 조절하였으며, n 번째 자료는 정오를 항상 포함하게끔 설정하였다(Table A5). 민감도는 30 분 단위 시계열 자료의 정보 엔트로피 계산 결과를 기준으로, 샘플링 간격을 조절한 자료의 계산 결과가 얼마나 다른지를 %로 나타내었다: 민감도(%) = (30 분 단위의 *I* 계산 결과-n 번째 샘플링 간격의 *I* 계산 결과) ×100/(30 분 단위의 *I* 계산 결과).

| Class | Sampling example | Sample size (2006–2020) |
|---------|--|-------------------------|
| 30 min | Every 30 minute (00:00, 00:30, 01:00, 23:30) | 17,520–17,568 |
| 1 hour | Every 1 hour (00:00, 01:00, 02:00, 23:00) | 8,760-8,784 |
| 2 hour | Every 2 hour (00:00, 02:00, 04:00, 22:00) | 4,380-4,392 |
| 3 hour | Every 3 hour (00:00, 03:00, 06:00, 21:00) | 2,920–2,928 |
| 4 hour | Every 4 hour (00:00, 04:00, 08:00, 20:00) | 2,190–2,196 |
| 6 hour | Every 6 hour (00:00, 06:00, 12:00, 18:00) | 1,460–1,464 |
| 8 hour | Every 8 hour (08:00, 12:00, 20:00) | 1,095–1,098 |
| 12 hour | Every 12 hour (00:00, 12:00) | 730–732 |
| 24 hour | Every 24 hour (12:00) | 365–366 |

Table A5. Sampling intervals and data size for the sensitivity test

자료 개수를 365-366 개(샘플링 간격 24 시간)에서 17,520-17,568 개(샘플링 간격 30분)까지 조절하며 계산한 결과, (1) *I*_σ의 경우, 자료 개수가 1,000 개 이상이면(샘플링 간격 1-8 시간), 민감도가 평균 10% 내외였고 경년 변동도 유사하였다. 자료 개수가 1,000 개보다 적으면 (샘플링 간격 12-24 시간), 민감도는 20-50%로 큰 폭으로 커졌으며 경년 변동도 상당히 달라졌다(Fig. A1, Table A6).



Figure A1. Dependency of I_{σ} on the sampling intervals

| Year | 30min | 1hour | 2hour | 3hour | 4hour | 6hour | 8hour | 12hour | 24hour |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 2006 | - | 0 | -1 | -1 | -2 | 8 | 7 | -22 | -60 |
| 2007 | - | 0 | -3 | -2 | -4 | 5 | 6 | -23 | -61 |
| 2008 | - | 0 | 0 | -1 | -2 | 9 | 8 | -20 | -55 |
| 2009 | - | 0 | -1 | 0 | -2 | 8 | 9 | -20 | -58 |
| 2010 | - | 0 | 0 | 0 | -1 | 9 | 6 | -23 | -63 |
| 2011 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 10 | -19 | -54 |
| 2012 | - | 0 | -1 | -1 | -2 | 9 | 11 | -17 | -52 |
| 2013 | - | -7 | -9 | -9 | -10 | 1 | 2 | -29 | -72 |
| 2014 | - | -1 | -1 | -1 | -4 | 8 | 9 | -18 | -51 |
| 2015 | - | -2 | -4 | -3 | -5 | 7 | 10 | -19 | -54 |
| 2016 | - | 0 | -1 | -1 | -3 | 9 | 9 | -19 | -53 |
| 2017 | - | 0 | -3 | -3 | -4 | 3 | 1 | -14 | -20 |

Table A6. Sensitivity (%) of I_{σ} depending on the sampling intervals

| 2018 | - | 0 | 0 | 0 | -2 | 9 | 11 | -17 | -50 |
|------|---|----|----|----|----|---|----|-----|-----|
| 2019 | - | 0 | -3 | -3 | -4 | 7 | 9 | -20 | -55 |
| 2020 | - | -1 | -1 | -1 | -2 | 9 | 8 | -21 | -56 |
| Avg | - | -1 | -2 | -2 | -3 | 8 | 8 | -20 | -54 |

(2) *I_J*의 경우, 자료 개수가 1,000 개 이상이면(샘플링 간격 1-8 시간), 민감도가 20% 내외였고 경년 변동도 유사한 편이었다. 자료 개수가 1,000 개보다 적으면(샘플링 간격 12-24 시간), 민감도가 40-60%로 커졌으며 경년 변동은 상당히 달라졌다(Fig. A2, Table A7).



Figure A2. Dependency of I_I on the sampling intervals

| Year | 30min | 1hour | 2hour | 3hour | 4hour | 6hour | 8hour | 12hour | 24hour |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 2006 | - | 0 | 0 | 4 | 4 | 6 | 3 | -18 | -29 |
| 2007 | - | -21 | -21 | -27 | -26 | -21 | -30 | -47 | -61 |
| 2008 | - | 3 | 3 | -33 | -33 | -28 | 2 | -54 | -73 |
| 2009 | - | 0 | -9 | -27 | -9 | -26 | -41 | -51 | -73 |
| 2010 | - | 1 | 0 | -8 | -9 | -6 | -11 | -37 | -54 |
| 2011 | - | -4 | -20 | -20 | -29 | -16 | -49 | -52 | -80 |
| 2012 | - | 0 | 1 | -5 | -5 | -1 | -9 | -21 | -35 |
| 2013 | - | -5 | 7 | -13 | -5 | -10 | -25 | -21 | -64 |
| 2014 | - | -36 | -36 | -48 | -37 | -46 | -50 | -82 | -99 |
| 2015 | - | -8 | -7 | -14 | -20 | -9 | -21 | -34 | -57 |
| 2016 | - | 1 | -7 | -16 | -7 | -13 | -13 | -34 | -47 |
| 2017 | - | -14 | -15 | -21 | -20 | -15 | -21 | -36 | -53 |
| 2018 | - | -6 | -2 | -4 | -14 | 2 | -16 | -30 | -45 |
| 2019 | - | 0 | -13 | -13 | -13 | -8 | -14 | -29 | -58 |
| 2020 | - | -13 | -12 | -12 | -13 | -9 | -18 | -28 | -61 |
| Avg | - | -7 | -9 | -17 | -16 | -13 | -21 | -38 | -59 |

Table A7. Sensitivity (%) of I_J depending on the sampling intervals

종합해보면, *I_σ와 I_J*는 둘다 자료 개수가 1,000 개 이상일 때 민감도는 10-20% 내외였고 경년 변동도 유사한 편이었다. 따라서 본 연구는 σ와 *J*의 시계열 자료의 정보 엔트로피를 계산하기 위해 필요한 최소 자료 개수를 1,000 개로 설정하였다.

94

Appendix 9. 후속 연구

- GDK 에서 수행되고 있는 에디-공분산 타워 기반의 모니터링과 식생 영구방형구 모니터링에서 얻어진 장기 관측 자료가 생태계 온전성 평가에 필수적이다. 따라서 지금까지 개선해 온 플럭스 자료 품질을 유지하여 장기 관측 자료의 연속성을 보장하고, 자연적인 교란과 인위적인 교란을 정량적으로 모니터링하는 것이 필요할 것이다.
- GDK 의 자기-조직화 역량의 감소가 외부 환경의 변화에서 기인한 것인지 혹은 생태계 내부의 변화에서 기인한 것인지를 추가적으로 조사하기 위해, 피셔 정보(fisher information)를 기반으로 각 시스템에서 체제 전환(regime shift)이 일어났는지 분석하는 연구가 도움이 될 것이다(Ahmad *et al.*, 2016; Cabezas & Eason, 2010). 또한 자기-조직화가 어떤 임계값보다 낮아져야 체제 전환이 일어나는지에 대한 연구도 진행할 수 있다. 이를 통해 온전성의 임계값이 결정된다면, 생태계 온전성을 유지하기 위한 직접적이고 직관적인 가이드라인을 구축할 수 있을 것이다.
- 생태계의 기능과 구조를 나타내는 상태변수들과 GDK 의 자기-조직화 역량의 관계를 분석하기 위해, 단순 선형 관계 뿐만 아니라 생태계를 복잡계(complex system)로 간주하는 과정망 분석(process network analysis)도 필요할 것이다(Ruddell & Kumar, 2009; Yun *et al.*, 2014).
 이를 통해 구성 요소들의 피드백 고리가 어떻게 맺어지고 끊어져서 시스템 차원에서 조직화된 과정망을 만들어내는지 이해하고, 과정망 형성과 해체 시점에 자기-조직화 역량의 변화를 비교할 수 있을 것이다.
- 온전성과 생물다양성의 관계에 대한 후속연구가 필요할 것이다.
 선행연구들은 생물다양성을 온전성과 동일한 개념으로 간주하거나(Clipp *et al.*, 2022), 온전성에 포함되는 하위 개념으로

95
간주하였다(Burkhard & Müller, 2008; Burkhard *et al.*, 2011; Haase *et al.*, 2018). 다양한 생태계에서 생태계 온전성 및 생물다양성을 정량화하여, 두 개념에 어떤 위계가 있는지 그리고 각각이 변화할 때 서로 어떤 관계에 있는지에 대해 연구할 필요가 있다.

 본 연구에서 제안한 생태계 온전성 평가도구를 핵심구역 뿐만 아니라 완충 및 전이구역에도 적용하여, 사람의 영향이 점진적으로 확대되는 완충 및 전이구역에서 온전성이 예상처럼 저하되는지 비교할 필요가 있다. 또한 본 평가도구를 임령과 수종이 다른 다양한 산림에도 적용하여 그 확장성과 유용성을 검증하고, 자기-조직화 역량이 임령에 따른 변화를 보이는지에 대한 후속 연구가 필요할 것이다.

Abstract

Ecosystem integrity assessment of Gwangneung old-growth forest in UNESCO Biosphere Reserve: A thermodynamic perspective Hyunyoung Yang

UNESCO Biosphere Reserve (BR) is a learning place for sustainable development. It provides local-level solutions to global sustainability issues by applying a transdisciplinary approach to understand and fully manage the responses and adaptation processes of ecological-societal systems to climate and environmental changes. The ultimate challenge in BR is to reconcile the sustainable use of ecosystem services with the conservation of biodiversity without compromising ecosystem integrity. Therefore, quantitative assessment and continuous monitoring of ecosystem integrity are necessary, but the ambiguity of the integrity's definition and the absence of a theoretical framework and systematic long-term monitoring data that are the basis for quantification are obstacles.

Based on the literature review, the definition of ecosystem integrity can be summarized with two key perspectives: (1) the reference state perspective and (2) the thermodynamic perspective. In the case of the former, integrity is defined as the preservation of the state of the ecosystem as compared to the reference state, while the latter is defined as the state in which the ecosystem maintains the self-organizing capacity. Here, self-organization is considered as a process of minimizing the accumulation of entropy within the system by organizing collective actions to create system-level order through the interaction among the elements that make up the system. The self-organizing capacity of an ecosystem can be expressed as the ratio of the thermodynamic entropy production within the system (σ) and the thermodynamic entropy transfer out of the system (J) (thus, $|J/\sigma|$). In this study, considering both the reference state perspective and the thermodynamic perspective, ecosystem integrity was defined as 'a state in which the self-organizing capacity of an ecosystem is not significantly different from that of the reference state'.

Gwangnueng Deciduous old-growth forest in Korea (GDK), one of the UNESCO's BR, was selected as a study site to evaluate the redefined ecosystem integrity. GDK is the main monitoring site of Korea's tower-based flux monitoring network (KoFlux) and is located within the core zone of Gwangneung Forest BR. Since 2005, various biometeorological variables including radiation balance, surface energy balance, and air temperature required for thermodynamic entropy calculation have been systematically observed up to now. In this study, the five years (2006–2010) prior to 2010 (when GDK was designated as BR) were assumed as a reference state and used as a period to quantify self-organization and identify its characteristics. The next 10-year period (2011–2020) was divided into two 5-year test periods, and the self-organization of each test period was assessed and compared with that of the reference state, thereby attempting to answer the question – 'Has the ecosystem integrity been maintained at GDK?'.

During the reference state period, σ was on average 13.8 ± 0.4 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, *J* was -10.4 ± 0.5 MJ m⁻² K⁻¹ yr⁻¹, and $|J/\sigma|$ was 0.76 ± 0.01 . An old-growth forest, GDK, showed consistent self-organizing capacity to control the accumulation of thermodynamic entropy within the ecosystem by transporting 74–77% of the thermodynamic entropy produced out of the system. During the first test period (2011–2015), *J* was relatively constant whereas σ continuously increased, resulting

in decreasing $|J/\sigma|$ but not statistically significant. This trend continued, however, in the second test period (2016–2020) and resulted in statistically significant decrease in $|J/\sigma|$, indicating that the GDK's integrity has degraded recently.

To better understand the cause of the recent degradation of self-organizing capacity of GDK, correlations were examined between the time series data of state variables that represent the function and structure of ecosystems during 2006–2020 and that of $|J/\sigma|$. The ratio of net radiation to incoming shortwave radiation (i.e., energy capture) and the ratio of respiration to biomass showed negative correlations with $|J/\sigma|$, and the changes in tree species diversity showed a positive correlation with those in $|J/\sigma|$.

To examine the above results more rigorously, changes in indeterminacy were examined by calculating information entropy from the half-hourly time series data of σ and J. The indeterminacy of σ and J increased during the test period compared to that during the reference state period, and the increase was larger in σ than J. Since increased indeterminacy means decreased self-organization, the degradation of integrity could be due to decreased self-organizing capacity in controlling the internal entropy production.

In summary, the decrease in $|J/\sigma|$ was the result of an increased σ with increased energy capture and also the failure of J to transport the excess amount of entropy produced within the system out to the environment. The decline in selforganizing capacity of the GDK old-growth forest is attributed to continuous increase in energy input as a result of persistent decrease in precipitation. In this study, we have redefined ecosystem integrity in terms of reference state and self-organizing capacity. The analysis of thermodynamic entropy using energy flux data observed for 15 years at GDK in BR demonstrated that the quantification of ecosystem integrity is not only possible but also a critical measure for continuous monitoring of the state changes in whole ecosystem. Furthermore, we showed that the information entropy calculated from the time series of thermodynamic entropy can serve as a complementary measure of self-organization. Persistent entropy accounting is needed to investigate the cause of the integrity degradation of GDK and the follow-up management. Further studies should test the consistency of the findings of this study by examining other old-growth forests and forests with different age and functional type. Once verified, usefulness and scalability of the integrity assessment and monitoring can contribute as an essential tool toward the BR mission – thriving societies in harmony within the biosphere.

Keywords: Ecosystem integrity, Self-organization, Thermodynamic entropy, UNESCO Biosphere Reserve, Long-term monitoring

Student number: 2019-38099

감사의 글

철저하고 건설적인 심사과정을 통해 본 연구를 심사해주신 심사위원분들께 감사드립니다. 서울대학교의 김현석 교수님, 김준 교수님, 임상준 교수님, 국립산림과학원의 천정화 연구관님, 국가농림기상센터의 강민석 박사님, 다섯 분의 날카로운 조언과 따뜻한 격려 덕분에 본 연구를 포기하지 않고 더 나은 방향으로 발전시킬 수 있었습니다. 특히 김현석 교수님과 임상준 교수님의 조언 덕분에 노령림의 본질에 대해서 깊게 생각해볼 수 있었습니다. 광릉 낙엽활엽수 노령림 사이트의 역사를 함께 하신 천정화 연구관님의 조언 덕분에 제 연구 사이트에 대해 더 많이 알 수 있었습니다. 플럭스 관측의 전문가이신 강민석 박사님 덕분에 플럭스 타워 기반의 장기 자료를 어떻게 다뤄야 할지를 고민할 수 있었습니다. 멀리 계셨지만 항상 관심 갖고 안부를 물어봐 주시던 고려대학교의 손요환 교수님, 석사 때 지도해 주셨고 박사 과정도 변함없이 응원해 주셨던 서울대학교의 이은주 교수님께도 감사드립니다.

특히 학문과 삶의 영역에서 제게 많은 가르침을 주셨던 지도 교수님이신 김준 교수님께 깊이 감사드립니다. 수업에서 교수님을 처음 뵈었을 때, 소명 의식을 갖고 학문을 대하시던 모습과 남들이 주목하지 않지만 누군가는 가야 하는 좁은 길을 묵묵히 가시던 모습이 아직도 생생히 떠오릅니다. 교수님의 엄격한 가르침 앞에 힘들고 눈물을 흘렸던 때도 있지만, 제가 더 단단해지고 깊어지는 시간이 되었습니다. 타협하지 않는 곧은 학자시며, 늘 성실하고 열정적으로 연구하시는 교수님께 존경하는 마음을 전해 드립니다. 덕분에 의미 있는 연구 질문을 던지고 논리적으로 설계 및 검증하는 방법을 배웠으며, 이를 위해 선행연구를 많이 읽는 습관이 정말 중요함을 깨달을 수 있었습니다. 항상 달리면서 살았던 제게 인생을 순리대로 사는 법을 가르쳐 주셔서 감사합니다. 앞으로도 맡겨진 것에 최선을 다하고, 소망을 품고 결과를 기다리는 삶을 살겠습니다.

101

함께 고민하면서 연구를 발전시키는데 도움을 주신 복잡계과학 연구실 구성원분들께도 감사드립니다. 현장 조사와 연구실에서 같이 고생했던 승훈 선배와 요하나가 그립고 보고 싶습니다. 일과 육아를 하면서도 연구실의 구성원으로서 기여하기 위해 애쓴 옥정 선배에게도 감사드립니다. 가끔 얼굴 뵐 때마다 반가웠던 주열 선배, 긴 시간을 통과해 결국에는 졸업한 탈룩더, 함께 있었던 시간은 짧지만 든든한 맏언니로 의지했던 지혜 언니, 제겐 한참 선배님이시지만 힘들 때마다 따뜻하게 격려해주신 채남이 박사님께도 감사드립니다. 모두들 각자의 자리에서 행복하고 의미 있는 삶을 살아가시길 응원하겠습니다.

연속적인 자료 수집과 관측소 관리에 헌신해 주신 모든 KoFlux 구성원분들께도 감사드립니다. 특히 플럭스 관측의 최전방에서 애쓰고 계신 국가농림기상센터의 관측팀 분들께 감사의 마음을 전합니다. 플럭스 타워의 자료 수집과 관리를 위해서는 장거리를 운전하고 높은 타워에 매달려서 민감한 장비들을 다뤄야 했는데, 저는 늘 서툴고 실수가 잦았던 것 같습니다. 이런 제가 이해할 수 있게 여러 번 설명해주시고, 현장과 원격에서 여러 도움을 주신 덕분에 안전할 수 있었습니다. 고되고 힘들었던 출장이었지만 강민석 박사님, 조성식 연구원님, 손승원 기술원님, 김종호 기술원님을 비롯한 관측팀 분들과 함께 였기에 많이 배우고 웃을 수 있었습니다. 또한 밤 늦게까지 함께 야근하며 동지애를 쌓았던 모델팀과, 저를 살뜰히 보살펴 주셨던 행정팀께도 감사의 인사를 드립니다. 국가농림기상센터 덕분에 외롭지 않은 대학원 생활을 할 수 있었습니다.

박사 학위 마지막 1 년은 국립산림과학원 국제산림연구과에서의 업무와 병행했는데, 저를 배려해주시고 용기를 주신 국제산림연구과 분들께도 감사의 인사를 전합니다. 최형순 과장님, 최은호 박사님, 양아람 박사님, 김래현 실장님을 비롯한 여러 분들의 응원 덕분에 박사 학위를 끝까지 마칠 수 있었습니다. 생태계의 보전과 지속가능한 이용의 조화를 위해 힘써 연구하시는 선배 연구자 분들을 따라, 저 또한 깊이 있는 연구자로 성장하겠습니다.

102

광야와 같던 대학원 과정을 통과할 수 있게끔 성경 말씀과 기도로 함께 해준 성경한스푼 모임과 새봄교회 교우들께도 감사의 마음을 전합니다. 말씀을 묵상하고 서로를 위해 기도했던 그 시간들이 오래 기억에 남을 것 같습니다. 덕분에 눈 앞의 상황에 매몰되지 않고 하나님의 신실하심을 의지하며, 대학원 과정을 인내할 수 있었습니다. 걱정과 조바심에 휩싸일 때마다 함께 운동하고 웃게 해준 소현과 예람에게도 고맙습니다. 가장 암흑 같고 힘들었던 순간에 제 곁을 지켜준, 그리고 앞으로도 함께 하겠다고 해준 채영에게 고맙습니다. 미처 이름을 적지 못했지만 저의 성장을 지켜봐 주신 분들께도 감사의 인사를 드립니다.

누구보다 저의 대학원 졸업을 응원하고 기뻐해준 엄마, 아빠, 동생 태현이에게 감사를 전합니다. 제가 하고 싶은 걸 선택할 수 있게 지지해주신 덕분에 여기까지 올 수 있었습니다. 연구와 일을 한다고 바빴던 저를 기다리기만 하셨는데, 이제는 조금 더 마음과 시간을 내어 함께 추억을 쌓고 싶습니다. 하늘에서 기뻐하실 외할아버지와 외할머니, 찰밥과 식혜를 해 놓고 기다리고 계실 친할아버지와 친할머니께도 감사의 마음 전해드립니다.

마지막으로, 소망의 이유되신 그리고 제 삶을 신실하게 인도하신 하나님께 감사드립니다. 대학원 과정에서 그러했듯이 앞으로의 시간도 하나님께 보폭과 속도를 맞추어 나란히 함께 걷고 싶습니다. 주님이 머무는 곳에 저도 머물고, 주님이 가시는 곳에 저도 가겠습니다. "이와 같이 그들은 여호와의 명령에 따라 진을 치기도 하고 행진도 하여 여호와께서 모세를 통해 지시하신 말씀에 순종하였다." (민수기 9:23)

본 연구는 국립산림과학원의 주요 산림 생태계 플럭스 타워 관측망 유지보수 및 자료 품질 관리 사업(2019-2023 년), 서울대학교 아시아연구소의 아시아연구기반구축 사업(2019-2022 년), 그리고 서울대학교 기초학문분야 학문후속세대 장학금(2019-2020 년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

103