

SOHO 수문모델링 프레임워크



정 한 석
서울과학기술대학교
/ 부교수
hanjeong@seoultech

1. 들어가며

“만물(萬物)은 유전(流轉)한다.”

만물유전은 고대 그리스 철학자 헤라클레이토스(Heraclitus)가 주창하여 오늘날까지 이어져 오는, 자연현상과 존재에 대한 우리 인간 이해의 정수를 보여주는 개념이다. 이는 만물유전이 실체의 고정을 부정하고, 모든 존재가 끊임없이 변화하는 과정에 있음을 역설하기 때문이다. 헤라클레이토스는 이를 “같은 강물에 두 번 들어갈 수 없다”라는 말로 상징적으로 표현하였다. 현대 과학은 비평형 열역학을 통해, 에너지와 물질의 흐름 속에서 시스템이 지속적으로 변화하며, 정적인 상태에 머물 수 없고 끊임없이 재구성된다는 사실을 이론적으로 뒷받침한다(Prigogine and Stengers, 1984).

만물을 이해하려는 관점에서 보자면 만물유전은 매우 불편한 진실이다. 특히 시스템을 수학적으로 모사해야 하는 모델링 과정에서는 그 불편함이 더욱 크게 다가온다. 관찰 대상인 시스템은 계속해서 변화하기 때문에, 이를 해석하고 기술하는 방식 또한 관찰자의 관점과 분석 시점에 따라 달라질 수 있다. 이는 시스템의 구조(structure), 과정(process), 그리고 다른 시스템과의 상호작용(interaction)이 정적인 형태로 고정되어 있지 않기 때문이며, 이러한 속성은 시스템 모델링이 본질적으로 지닌 어려움을 보여준다. 그럼에도 불구하고, 자연현상의 변화 과정을 이해하기 위한 도구인 수문모델링은 ‘만물유전’이라는 존재론적 인식을 모델링의 핵심 준거로 삼아야 한다. 수문모델링의 대상인 수문시스템은 에너지, 물질, 그리고 정보의 지속적인 흐름 속에 존재하며, 따라서 기존의 단선적이고 정적인 방법

론보다는 이러한 흐름과 순환을 충실히 반영할 수 있는 방식으로 구성될 때, 보다 진실에 가까운 이해(verisimilitude)와 예측이 가능해진다.

이러한 문제 인식은 새로운 것이 아니다. 많은 훌륭한 연구자들이 그 필요성을 Coupled Human and Natural Systems(CHANS)(Liu et al., 2007), Social-Ecological Systems(SES)(Folke, 2006; Ostrom, 2009), 그리고 사회수문학(Sivapalan et al., 2012)과 같은 인간-자연 통합시스템 접근을 통해 제기해 왔다. CHANS는 인간시스템과 자연시스템이 단순히 병존하는 것이 아니라, 상호 피드백을 통해 동적으로 연결되어 있다는 인식에 기반한다. 이러한 관점은 인간의 행동, 정책, 제도적 맥락과 생태·물리 시스템 간의 상호작용을 통합적으로 분석할 수 있는 틀을 제공하며, 시스템 전체의 거동이 개별 구성요소의 단순한 합을 넘어서는 특성을 보인다는 점을 강조한다(Liu et al., 2007). SES는 생태시스템과 사회시스템 간의 구조적 상호의존성을 전제로, 양자 간의 상호작용이 어떻게 시스템의 지속가능성과 회복탄력성(resilience)에 영향을 미치는지를 탐구하는 분석 틀이다(Folke, 2006; Ostrom, 2009). 사회수문학은 CHANS와 SES 개념을 수문시스템에 적용한 비교적 새로운 접근으로 이해할 수 있다. 이러한 통합시스템 접근법들은 모두 대상시스템을 복잡계(complex system)로 인식하고 해석하려는 시도이다. 만물유전은 복잡계의 철학적 전제이며, 복잡계는 만물유전의 과학적 구현인 것이다.

농업유역은 단순한 물리적 현상 이상의 다양한 요소들이 상호작용하는 복잡계의 대표적 사례이다. 농업유역은 강우, 증발산, 유출과 같은 자연적 수문현상뿐만 아니라, 농작물 재배, 관개와 배수, 최적관리기법 등 인간 활동과 더불어 기후변

동성과 사회경제적 격차(socioeconomic gradient)와 같은 외생변수들이 복합적으로 얹혀 끊임없이 변화하는 특성을 가진다. 이러한 속성은 기존의 선형적 접근으로는 농업유역 시스템의 동태성을 정확히 파악하거나 예측하기 어렵게 만든다. 본고에서는 농업유역의 상호작용과 변화를 보다 실제적으로 이해하고, 장기적이고 지속가능한 유역관리를 위한 수문모델링 방법으로 SOHO(self-organizing, holarchic, open systems) 프레임워크를 제안하고 소개하고자 한다.

2. SOHO로서의 농업유역 이해

SOHO 프레임워크는 Kay 박사와 동료들이 제안한 복잡계 기반의 개념적 모형으로, 자연 및 사회 시스템이 상호작용하며 동적으로 진화하는 과정을 설명하기 위한 통합 이론이다(Boyle et al., 2001; Kay et al., 1999; Kay and Regier, 2000). 해당 프레임워크는 비선형적 상호작용을 통해 스스로 구조를 생성하고 진화하는 스스로 짜임(self-organization), 전체이면서 동시에 부분으로 존재하는 구성단위 간의 중첩적 계층 구조인 홀아키(holarchy), 그리고 외부와의 지속적인 에너지, 물질, 정보 교환을 전제로 하는 개방성의 세 가지 핵심 원리에 기반한다(Kay, 2000; Kay and Schneider, 1992). SOHO는 단일 모형이라기보다 다양한 시공간적 규모에서 복잡계의 구조적·기능적 진화를 이해하고 해석하는 데 도움을 주는 분석 렌즈로 작동한다고 볼 수 있다.

스스로 짜임은 시스템 구성요소 간의 피드백 루프와 자가촉매적 과정(autocatalytic processes)을 통해 외부 지시 없이 자발적인 질서와 구조가 형성되는 과정을 뜻한다(Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine and Stengers, 1984). 이러한

스스로 짜임은 에너지 흐름과 비선형적 상호작용이 존재할 때 나타나며, 시스템의 회복력과 적응성을 뒷받침하는 근본적 원리로 작용한다(Kay, 2000). 농업유역에서는 농민들이 환경과 자원의 제약 속에서 스스로 조정하는 관개 방식, 작물 선택, 그리고 경작 시기 조절 등이 그러한 스스로 짜임의 구체적 사례가 된다. 이는 농업 공동체의 역사적 경험, 문화적 규범, 그리고 변화하는 환경 조건에 대한 적응적 학습을 통해 축적되며, 시스템 전체의 복잡한 거동을 만들어낸다.

홀아키는 Koestler가 제시한 개념으로, 부분 이면서 동시에 전체인 ‘홀론(holon)’들이 느슨하게 중첩된 계층 구조를 이루는 체계를 의미한다(Koestler, 1967). Kay(2000)는 생태계와 사회시스템을 다층적이고 중첩된 구조를 갖는 홀아기로 이해할 수 있다고 보았다. 이때 각 계층은 독립적으로 기능하면서도 상위 계층과 연결되어 변화에 영향을 주고받는다. 이러한 구조는 단순한 수직 위계와 달리, 유연하고 상호의존적인 상호작용을 가능하게 하며, 시스템 내에서 통합성과 적응성을 동시에 촉진한다. 농업유역에서는 개별 농가, 마을, 행정 단위 또는 물관리 단위 등 실질적인 관리 단위가 서로 연결되어 있으면서도 각기 독립된 기능을 수행하며, 이들이 유역 수문시스템과 상호작용하는 다층적 구조를 이룬다.

개방성은 열역학적으로 비평형 상태의 시스템이 외부로부터 에너지, 물질, 정보 등을 흡수하고 방출하면서 끊임없이 구조와 기능을 재구성하는 특성을 의미한다(Kay, 2000; Prigogine and Wiame, 1946). 개방시스템은 외부와의 상호작용을 통해 변화에 반응하며, 스스로 짜임을 가능하게 하는 동역학적 기반이 된다. 농업유역은 강수, 기온, 농업 보조정책, 시장 요인 등 다양한 외생요인의 영향을 지속적으로 받으며, 이러한 외생

요인은 유역 내 수문 과정과 인간의 농업 활동 간의 상호작용을 끊임없이 변화시킨다. 예를 들어, 특정 작물에 대한 보조금 정책이 작물 선택, 비료 사용, 물 수요에 영향을 주고, 이는 다시 유역 내 수질 및 유출 패턴의 변화를 유도한다.

SOHO로서의 농업유역 이해는, 기존 수문모델링이 간과해온 사회적·경제적 요인의 시간적 변화와 수문시스템과의 피드백 구조를 정량적으로 모형화할 수 있다는 점에서 농업수문 분야에 중요한 전환점을 제공한다. 이 프레임워크는 사회시스템과 수문시스템 간의 상호작용을 내생적으로 통합하고, 공진화(coevolution) 과정을 반영함으로써 다양한 미래 시나리오 속에서 농업유역의 지속가능성을 분석하고 전략적 의사결정을 지원할 수 있는 분석 도구로 작동한다. 특히, 정책 변화나 시장 변동성과 같은 외생 요인들이 수문 과정에 미치는 복합적 영향을 전체적(holistic)으로 이해하게 함으로써, 시스템의 장기적 적응성 및 회복탄력성을 평가하는 데 효과적인 수단이 된다. 이는 단순한 변수 간 인과관계를 넘어서, 구조-과정-피드백으로 구성된 다층적 시스템 다이내믹스를 반영함으로써, 기후위기와 사회경제적 불확실성이 고조되는 오늘날의 환경 속에서 농업사회수문시스템을 보다 실제적으로 이해하고 대응 전략을 수립하는 데 기여한다(그림 1).

3. SOHO 수문모델링 프레임워크

기계적 수문시스템 해석의 한계와 인간활동의 수문시스템과의 순환적 관계 인식에서 시작한 사회수문학은 수문시스템과 인간활동 사이의 상호작용과 공진화를 통합적으로 이해하려는 학문적 접근이다(Sivapalan et al., 2012). 사회수문모델링을 포함한 인간과 자연이 연계된 시스템 모델링

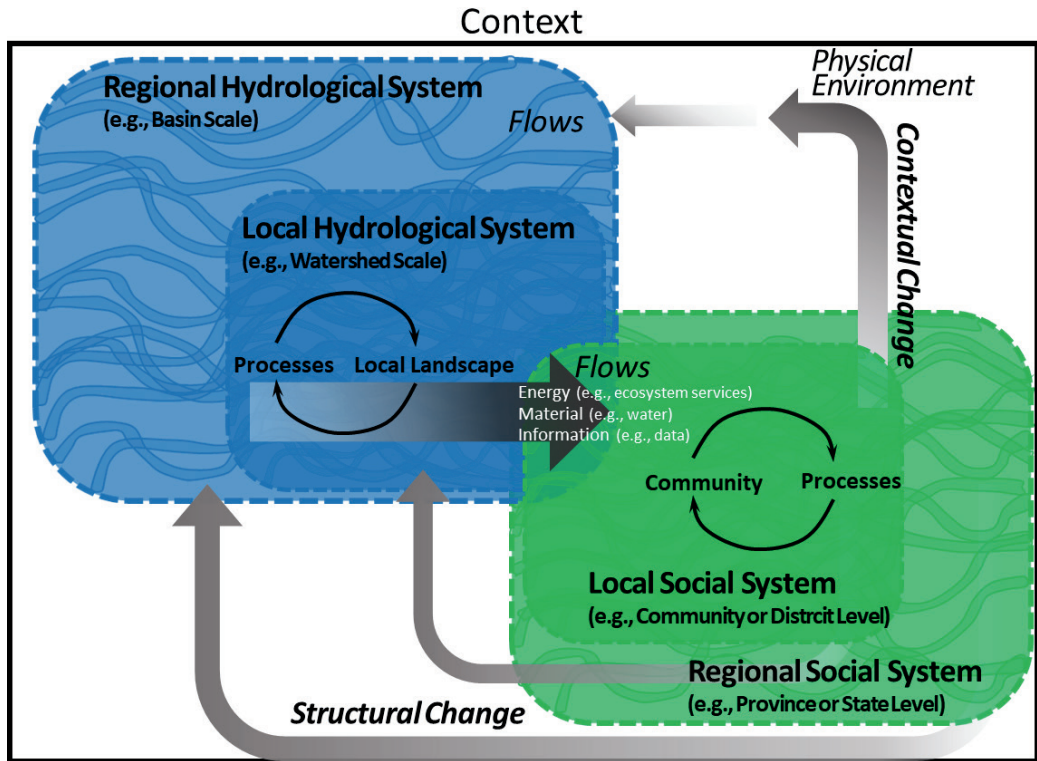


그림 1. SOHO로서의 농업유역 이해: 지역 및 광역 규모의 수문시스템과 사회시스템 간의 계층적(holarchic) 구조와 상호작용을 개념적으로 나타낸 SOHO 프레임워크의 구조적 예시. 수문시스템은 사회시스템의 맥락(context)을 형성하며, 아래쪽 화살표는 수문시스템에 대한 사회의 직접적인 영향(즉, 구조적 변화)을 나타낸다. 위쪽의 더 큰 화살표는 생태계에 대한 사회의 간접적인 영향(즉, 맥락적 변화로 수문시스템의 맥락을 변화시켜 결과적으로 사회시스템에 변화를 유도)을 나타낸다. 계층적으로 형성된 구조(예: 수문시스템의 local hydrological system과 regional hydrological system)는 각 수준이 여러 하위시스템의 집합체로 이루어져 있음을 보여준다. 지역 수문시스템(local hydrological system)은 지역 사회시스템(local social system)과 에너지(예: 생태계 서비스), 물질(예: 물), 정보(예: 데이터) 등의 흐름을 통해 상호작용하며, 이러한 상호작용은 사회시스템의 행위와 제도 변화를 수문시스템의 과정 및 구조 변화로 이어지게 한다(구조적 변화). 한편, 광역 사회시스템(regional social system)은 상위 맥락에서 수문시스템의 환경 조건에 영향을 주며(맥락적 변화), 이러한 변화는 다시 사회시스템의 행위 맥락을 재구성함으로써 인간-수문 피드백 루프를 형성한다. 또한, 각 홀아키 수준(예: 지역, 광역)은 다수의 하위시스템들로 구성되어 있으며, 상호 연결된 구조 속에서 자기조직화된 적응 행동과 공진화가 이루어진다.

(예: 통합수자원관리)은 일반적으로 네 개의 하위 시스템으로 구성되며(Loucks et al., 2005), 상호작용과 스스로 짜임, 동태적 피드백을 내포한 복잡계 접근을 공유하고 구조적 유사성을 가진다는 측면에서 SOHO 모형과 같은 접근방법으로 이해할 수 있다(그림 2).

사회수문모형링은 농업사회수문시스템의 공진화 및 확률공간(possibility space) 기반의 유역관리를 탐구하는 데 성과를 거두었지만(Elshafei et

al., 2015; Jeong et al., 2020), 간단한 가정을 통해 인간과 사회시스템을 지나치게 단순화하거나, 수문과정(hydrological processes)에 대한 상세한 정보를 제공하지 못하는 한계가 있다. 이는 인간과 사회시스템의 실제 다양한 변화 가능성을 모의하거나, 특정 수문구성요소(예: 지표수, 지하수, 수질 등)에서 발생하는 주요 문제를 파악하여, 이를 해결하기 위한 수문과정의 조정 방안을 탐구하는 데 어려움을 초래한다.

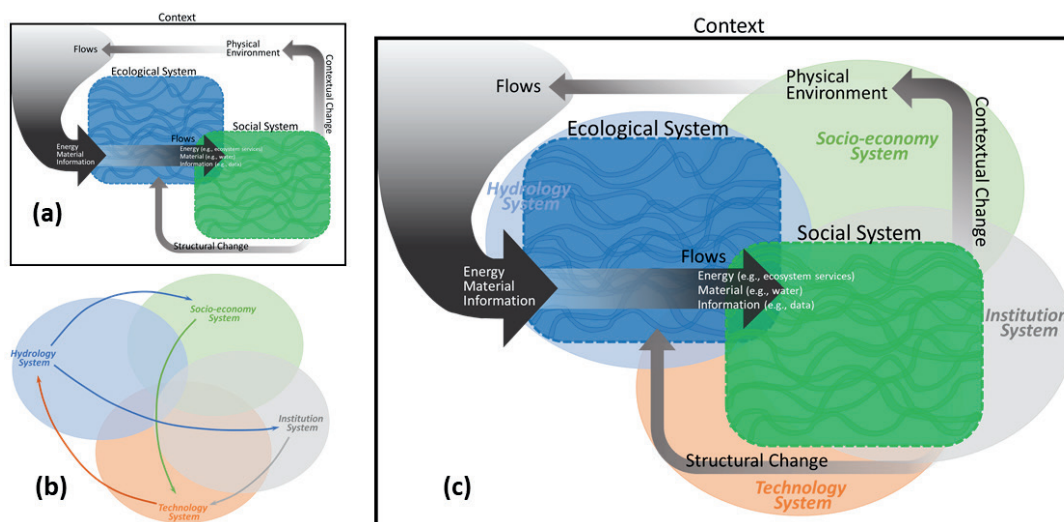


그림 2. SOHO 모형과 기존 인간-수문 연계 시스템 모델링 간의 구조적 연결. (a) 단일 홀아키 수준의 SOHO 모형. (b) 수문시스템, 기술시스템, 사회경제시스템, 그리고 제도시스템으로 구성된 인간-수문 연계 시스템 모델링의 구성. (c) 상호작용과 동태성에 기반한 SOHO 모형과 인간-수문 연계 시스템 모델링의 연결 관계. SOHO모형의 생태시스템, 사회시스템, 구조적 변화, 그리고 맥락적 변화는 기존 연계 시스템에서 각각 수문시스템, 제도시스템, 기술시스템, 그리고 사회경제시스템에 상응한다.

SOHO 수문모델링 프레임워크에서는 상기의 한계를 극복하기 위해 인간사회탐사(human social sensing)를 포함한 혁신기술을 활용한다. 인간사회탐사는 인간생성 데이터(human-generated data)로부터 인간의 행동, 의견, 태도 등의 분석을 통해 사회적 동향과 상호작용을 탐구하는 방법론으로, 혁신기술의 비약적 발전으로 활용 가능성이 확대되고 있다(Galesic et al., 2021). 사회시스템은 구성원 간의 상호작용을 통해 스스로 규범, 여론과 같은 구조와 패턴을 형성하는 스스로 짜임 특성을 보이며(Helbing et al., 2011), 이는 인간생성 데이터를 통해 정량적으로 표현될 수 있음을 시사한다. 따라서, 사회관계망에서 수집한 게시물, 신문기사 등을 활용하여 특정 지역의 사회적 태도 변화나 정책 반응을 실시간으로 모니터링할 수 있으며, 자연어처리, 시계열 분석, 기계학습 알고리즘 등을 통해 처리 및 해석하여 사회적 맥락(context)의 동태성을 모형화할 수 있다. 이처럼, 인간사회탐사를 활용하여 인간활동과 사

회적 요인의 변화가 만드는 수문시스템을 둘러싼 맥락의 동태성을 모형화하고, 기존 사회수문모델링 방법으로부터 인간과 수문시스템이 결합된 개방시스템의 공진화 과정을 모의함으로써 농업사회수문시스템의 전체적 탐색을 가능하게 하는 새로운 SOHO 모형 기반 수문모델링 프레임워크를 개발할 수 있다.

SOHO 수문모델링 프레임워크는 물환경과 수자원 관리 목적에 따라 모델링의 구체성과 동태성의 정도를 유연하게 적용할 수 있는 접근법이기도 하다. 예를 들어, 공동체 수준(community level) 사회시스템은 단순 시나리오, 미분방정식, 개념적 사회모형, 그리고 인간사회탐사 등의 방법 중 모델링의 목적에 맞게 선택하여 적용할 수 있다. 이때, 물관리 정책의 농업유역에 대한 단기적 효과를 스크리닝할 경우에는 단순 시나리오 방식이 적절하며, 반면 장기적인 공진화 과정을 분석하고자 하면 인간사회탐사가 효과적인 도구가 될 수 있다. 이는 기존의 시나리오 기반의 국가물관리기

본계획과 같은 정책 분석의 연속성을 보장할 뿐만 아니라 다양한 시공간 규모에서의 인간 및 자연환경 변화에 따른 농업사회수문시스템의 확률공간을 펼쳐 보일 수 있음을 의미한다.

4. 나옴

만물은 유전한다. 동시에 만물은 서로 연결되어 있다. 정적인 조건에 기반한 물리적 수문모델링은 대개의 상황에서 유효하며, 높은 신뢰도를 제공한다. 그러나 기후위기와 같이 불확실성과 복잡성이 지배하는 시대에는, 단일한 미래를 예측하기보다는 다양한 가능성과 경로의 탐색을 돕고 우리가 아직 인지하지 못한 가능성(unknown unknowns)까지 펼쳐 보이는 것이 수문모델링의 본령이라 생각한다. SOHO 수문모델링 프레임워크는 물리기반 수문모델링의 결정론적 접근인 뉴토니안(Newtonian) 관점과 사회시스템의 진화 및 적응적 특성에 주목하는 다위니안(Darwinian) 관점을 결합함으로써, 수문시스템과 사회시스템 간의 복잡한 상호작용을 통합적으로 이해하고자 한다는 점에서 기존 수문모델링 접근의 철학적 전환을 시사한다. 이는 농업수문 거동을 물리법칙에 기반하여 정량적으로 분석하는 동시에, 인공지능을 활용하여 인간 활동과 제도 변화가 만들어내는 동태적 경계조건을 진화적 관점에서 탐색할 수 있는 새로운 수문모델링 패러다임을 제시한다는 점에서 중요한 학술적·실천적 시사점을 갖는다.

참고문헌

- Boyle, M., Kay, J. J., and Pond, B., 2001, Monitoring in support of policy: An adaptive ecosystem approach, New York: Wiley.
- Elshafei, Y., Sivapalan, M., Coletti, J. Z., and Hipsey, M. R., 2015, A model of the socio-hydrologic dynamics in a semi-arid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system, *Water Resources Research* 51(8): 6442–6471.
- Folke, C., 2006, Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses, *Global Environmental Change* 16(3): 253–267.
- Galesic, M., Bruine de Bruin, W., Dalege, J., Feld, S., Kreuter, F., Olsson, H., Prelec, D., Stein, D., and van der Does, T., 2021, Human social sensing is an untapped resource for computational social science, *Nature* 595: 214–222.
- Helbing, D., Yu, W., and Rauhut, H., 2011, Self-organization and emergence in social systems: Modeling the coevolution of social environments and cooperative behavior, *The Journal of Mathematical Sociology* 35(1/3): 177–208.
- Jeong, H., Bhattarai, R., Adamowski, J., and Yu, D. J., 2020, Insights from socio-hydrological modeling to design sustainable wastewater reuse strategies for agriculture at the watershed scale, *Agricultural Water Management* 231: 105983.
- Kay, J. J., 2000, *Ecosystems as self-organizing holarchic open systems: Narratives and the second law of thermodynamics*, Boca Raton: CRC Press.
- Kay, J. J., and Regier, H. A., 2000, *Uncertainty, complexity and ecological integrity: Insights from an ecosystem approach*, Dordrecht: Kluwer

Academic.

9. Kay, J. J., and Schneider, E. D., 1992, Thermodynamics and measures of ecological integrity, New York: Elsevier.
10. Kay, J. J., Boyle, M., and Regier, H. A., 1999, An ecosystem approach for sustainability: Addressing the challenge of complexity, *Futures* 31(7): 721–742.
11. Koestler, A., 1967, *The Ghost in the Machine*, London: Hutchinson.
12. Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., et al., 2007, Complexity of coupled human and natural systems, *Science* 317(5844): 1513–1516.
13. Loucks, D. P., Van Beek, E., Stedinger, J. R., Dijkman, J. P., and Villars, M. T., 2005, *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*, Paris: UNESCO.
14. Nicolis, G., and Prigogine, I., 1977, *Self-Organization in None-Equilibrium Systems*, New York: Wiley.
15. Ostrom, E., 2009, A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems, *Science* 325(5939): 419–422.
16. Prigogine, I., and Stengers, I., 1984, *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*, Toronto: Bantam.
17. Prigogine, I., and Wiame, J. M., 1946, *Biologie et thermodynamique des phenomenes irreversibles*, *Experientia* 2(11): 451–453.
18. Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., and Blöschl, G., 2012, Socio-hydrology: A new science of people and water, *Hydrological Processes* 26(8): 1270–1276.

감사의 글

이 학술기사는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-00557036)을 받아 수행된 기초연구사업입니다. 이에 감사드립니다.