

사회수문학의 현재와 가능한 미래

Water
for future
학술/기술 기사
01



정 한 석

서울과학기술대학교
환경공학과 조교수
hanjeong@seoultech.ac.kr



정은 성

서울과학기술대학교
건설시스템공학과 교수
eschung@seoultech.ac.kr



유 제 훈

퍼듀대학교
토목공학과·정치학과 조교수
davidyu@purdue.edu



장 희 준

포틀랜드주립대학교
지리학과 교수
changh@pdx.edu

1. 들어가며

사회수문학(Socio-hydrology)은 인간사회와 인간행동을 수문시스템의 외생변수가 아닌 하나의 구성 요소로 고려하여 인간과 물이 연계된 시스템의 동태성(dynamics)과 공진화(coevolution)를 이해하고자 하는 학문이다(그림 1). 사회수문학은 최근 10년 동안 괄목할 만한 성장을 하였으며, 인간사회와 수문시스템을 통섭(通涉)적으로 연구하고자 하는 연구자들로부터 큰 주목을 받고 있다. 그 원동력은 수자원과 관련된 많은 현상들이 인간계와 수문계를 분리하고 그 중 하나만 분석해서는 설명할 수 없다는 근본적인 문제의식과 기존 학문간의 경계를 허무는 융합적 사고의 대두이다. 많은 연구자들이 사회시스템을 기

존의 수문시스템에 어떻게 연결시켜 해석할 수 있는지(Di Baldassarre 등, 2013; Elshafei 등, 2014), 사회수문학 프레임워크와 모형을 통해 기존 수문 모형으로는 모의할 수 없었던 사회수문학적 혹은 수문사회학적 문제들을 어떻게 설명할 수 있는지(Yu 등, 2017), 그리고 사회수문학 모형이 실제 수문학적 문제해결에 어떻게 사용될 수 있는지 연구하였다(Elshafei 등, 2016; Jeong 등, 2020). 특히, 최근 사회수문학의 발전은 Water Resources Research의 Debates-Perspectives on Socio-Hydrology (2015)와 Socio-hydrology: Spatial and Temporal Dynamics of Coupled Human-Water Systems (2017), Journal of Hydrology의 Building Socio-Hydrological Resilience (2018), 그리고 Hydrological Sciences Journal의 Advancing socio-hydrology: a synthesis of coupled human-water systems across disciplines (2020) 등의 특별호를 통해서 소개되었으며, Hydrology and Earth Systems Science를 통해서 중요 논문들이 많이 발표되었다. 사회수문학 개념은 본지의 김과 정 (2015) 기사를 통해 비교적 상세하게 소개된 바 있기 때문에, 본고에서는 필자들이 생각하는 현재 사회수문학의 주요 연구성과와 통합물관리에 사회수문학(엄밀히는 사회수문모형)이 어떻게 기여할 수 있는지에 대해 기술하였다.

2. 사회수문학의 현재

가. 사회시스템과 수문시스템의 연계

사회수문학의 가장 큰 업적 중 하나는 어떻게 인간과 인간활동을 전통적인 수문시스템과 연계할 수 있는지 보여준 것이라 할 수 있다. 그간

의 주요연구에서 사회시스템과 수문시스템의 연계는 주로 사회적 인식(social awareness)과 공동체 민감성(community sensitivity)을 활용하여 이루어졌다. Di Baldassarre 등 (2013)은 인간과 홍수시스템을 연계함에 있어 인간의 홍수에 대한 기억 정도를 활용하여 사회적 인식을 모형화하였으며, Elshafei 등 (2014, 2015)은 수자원 가용량(water availability)과 생태계서비스(ecosystem services), 그리고 경제적 회수율(economic return)의 요소를 활용하여 공동체 민감성을 표현하였다. 공동체 민감성이 수문시스템에 실제적인 영향으로 표출되기 위해서는 행동 반응(behavioral response)이 필요하며, 이를 사회수문학적 요구(demand)를 고려하여 모형화하였다(Elshafei 등, 2014). 또한, Yu 등 (2017)은 공동체 민감성(또는 사회적 인식)과 확정론적 행동 반응(deterministic behavioral response)만으로 사회시스템과 수문시스템이 연계되는 것의 한계를 지적하며, 사회생태시스템(Social-Ecological Systems)과 공유자원 관리(governance of the commons)연구에서 사회시스템과 생태시스템을 연계할 때 주요하게 고려되는 제도적 규칙과 규범(formal and informal institutions)과 이것이 수자원과 관련된 집단행동문제(collective action problem)에 끼치는 영향이 사회적 인식과 함께 중요한 역할을 할 수 있음을 보인 바 있다. 최근, 사회시스템과 수문시스템의 연계와 관련하여, 수문학적 영향이 인간의 행동 반응에 이르는 과정을 인간의 가치와 믿음이 사회적 표준을 만들어내는 과정을 설명하는 가치-신념-규범(Value-Belief-Norm) 이론과 문화적 진화(cultural evolution) 이론을 활용하여 설명하고자 하는 논의가 이루어지고 있다(Pande와 Sivapalan, 2017;

Roobavannan 등, 2018; Yu 등, 2020).

나. 수문사회학적 현상의 이해

수문사회학적 현상을 재현하는 것은 인간과 물이 결합된 시스템의 공진화와 창발적 현상을 이해하기 위해 시작된 사회수문학의 목적에 가장 부합하는 연구라 하겠다. Di Baldassarre 등 (2013)은 제방이 높을수록 홍수에 대한 피해 빈도는 낮지만, 역사적인 홍수 피해를 발생시킬 수 있는 제방효과(levee effect)를 사회수문모형을 통해 재현하였으며, 해당 모형을 이용하여 홍수와 함께 살아가는 전략(홍수피해에 간헐적으로 노출되는 전략)이 일반적인 구조적 홍수관리전략보다 회복탄력성이 큰 홍수관리전략일 수 있음을 보였다. 더 나아가 Yu 등 (2017)은 홍수와 함께 살아가는 전

략(상대적으로 홍수에 더 노출되는 전략)이 홍수관리를 가능하게 하는 집합행위에 대한 사회적 규범을 더 잘 유지할 수 있게 함으로써 해안 간척지의 홍수에 대한 적응능력을 증가시킬 수 있고, 따라서 사회가 홍수에 대해 가진 회복탄력성(flood resilience)을 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, Elshafei 등 (2015)은 한 세기 동안의 인간과 수문시스템의 동태성과 공진화를 공동체 민감성을 중심으로 고찰하였으며, 유역의 지형적 특성이 유역간의 수문시스템 변화에 대한 공동체 민감성 반응의 차이를 야기할 수 있음을 보였다.

다. 사회수문모형의 활용

Sivapalan 등 (2012)이 사회수문학에 대한 개념을 정리하며, 사회수문학은 역사, 비교, 그리고 과

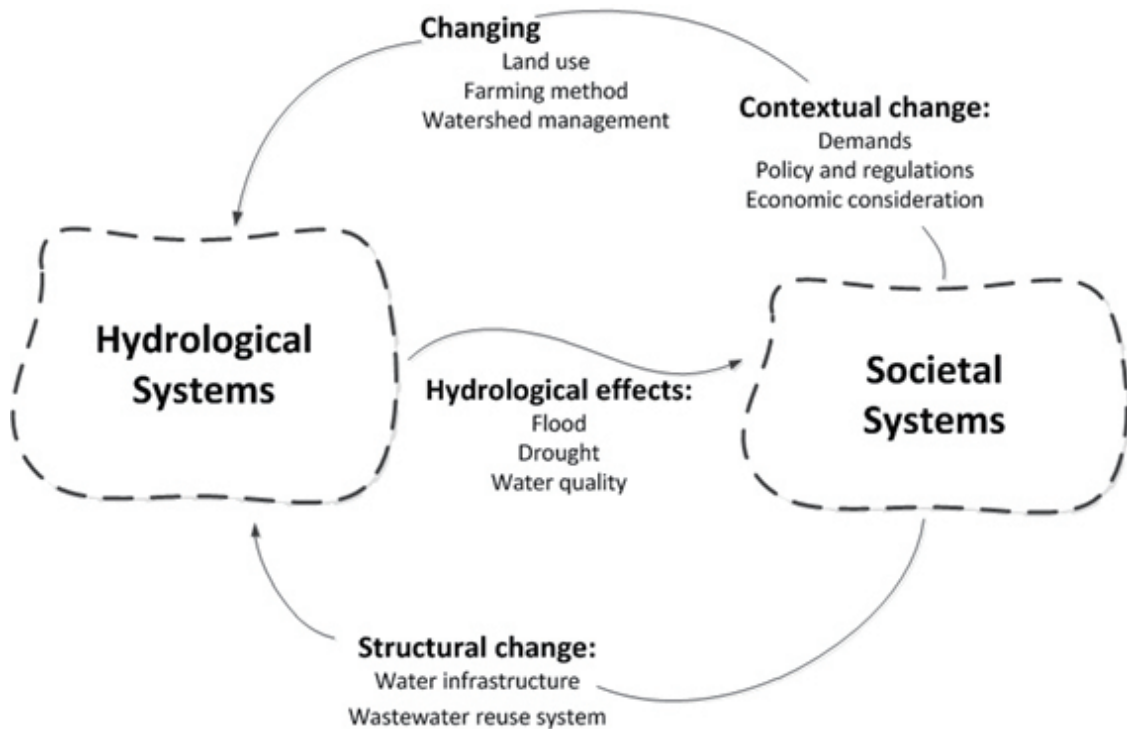


그림1. 수문시스템과 사회시스템의 상호작용. 인간과 인간활동이 내용적 구조적 변화를 통해 수문시스템에 영향을 미치며, 변화된 수문시스템이 다시 사회시스템에 영향을 미치는 피드백 루프로 하나의 전체적 사회수문시스템을 완성한다.

정 사회수문학의 영역으로 발전할 것으로 내다보았다. 역사사회수문학은 역사적으로 물이 인간 활동에 어떻게 영향을 미쳐 왔는지, 또한 인간 활동이 물에 어떤 영향을 미쳤는지를 재구성하고 연구하는 것이다. 비교사회수문학은 개별 유역의 반응을 관찰하기보다는 유역간의 차이와 유사성을 기후와 토지이용 그리고 인간 활동의 차이를 통해서 이해하고자 하는 노력이다. 역사사회수문학이 시간적 척도에 따른 분석이라면, 비교사회수문학은 공간적 척도에 따른 분석이다. 과정사회수문학은 질적 또는 서술식 연구를 기반으로 하는 역사사회수문학과 비교사회수문학을 보완하기 위한 것으로 정량적 연구를 지향하며, 소규모 사회-수문시스템의 인과관계에 대한 보다 상세한 통찰을 통해 현재의 사회-수문시스템의 기능을 이해하고 미래의 사회-수문시스템의 변화궤적(trajjectory)을 예상하고자 한다.

사회수문모형을 개발하기 위해서는 역사사회수문학의 입장에서 장기간에 걸친 인간과 수문시스템의 공진화 과정을 역사적 자료를 이용하여 이해하고 분석할 필요가 있으며, 역사사회수문학의 결과물이 과정사회수문학의 결과물인 사회수문모형의 검정에 활용될 수 있다. 또한, 사회수문모형이 일반화되기 위해서는 비교사회수문학 접근이 필요하며, 이는 개발된 하나의 모형이 범용성을 가지는 일반모형으로 적용성을 확보하여야 함을 의미한다. Elshafei 등 (2014)의 모형에서는 거시적 규모(macro-scale) 매개변수들(기후, 사회경제, 그리고 정치체제)을 통해 모형을 적용하는 대상 지역의 사회시스템 성격을 고려함으로써 모형의 범용성을 확보하고자 하였다.

실제 사회수문모형의 개발에는 시스템다이나믹스(system dynamics) 모델링과 행위자기반모

델링(agent-based modeling)이 활용될 수 있다 (Blair와 Buytaert, 2016). 시스템 구성요소의 관계를 결정론적으로 정의할 경우에는 시스템다이나믹스 모델링 기법을 활용하며, 각 행위자들 사이의 창발적 진화를 중요하게 고려할 경우에는 행위자기반모델링 기법을 활용하게 된다. 지금까지 개발된 사회수문모형의 경우에는 주로 시스템다이나믹스 모델링 기법을 활용하였으며, 그 경우 상용프로그램(예: Vensim, Stella)을 이용하기 보다는 상태변수(state variable)와 미분방정식으로 시스템의 동태성을 표현하였다. 개발한 사회수문모형의 검정은 시스템다이나믹스 기반 모형의 검정 방법과 동일하게, 시스템의 이론적 동태성을 잘 반영하는 지를 검정하며(Stave, 2003), 그와 동시에 전통적인 수문시스템의 검정 과정을 거치는 경우가 일반적이다. 특히, 사회수문모형의 사회시스템(예: 공동체 민감성)의 거동은 객관적인 검정이 어렵기 때문에, 신문기사를 포함한 역사적 자료를 통해 장기간의 사회시스템 거동을 분석하는 방법이 적용되고 있다(Chen 등, 2016). 일례로 Chang 등 (2021)은 사회생태기술 학습 프레임워크(socio-ecological-technological learning framework)를 이용하여 서울, 동경, 그리고 포틀랜드의 도시계획문서와 자연재해저감 정책문서를 시계열적으로 비교연구함으로써 각 사회가 어떻게 홍수피해를 줄이기 위해 노력해 왔는지를 시사하였다.

사회수문학에 기반한 사회수문시스템의 예측은 특정 시점의 시스템 반응을 추정하기보다 전체시스템의 동태적 거동에 따른 관심 요소의 변화와 근원적인 메커니즘을 이해하는 것을 목적으로 한다. 그것은 사회수문모형의 모의를 통해 10년 후, 20년 후의 하천유량이 얼마나 증가 혹은 감

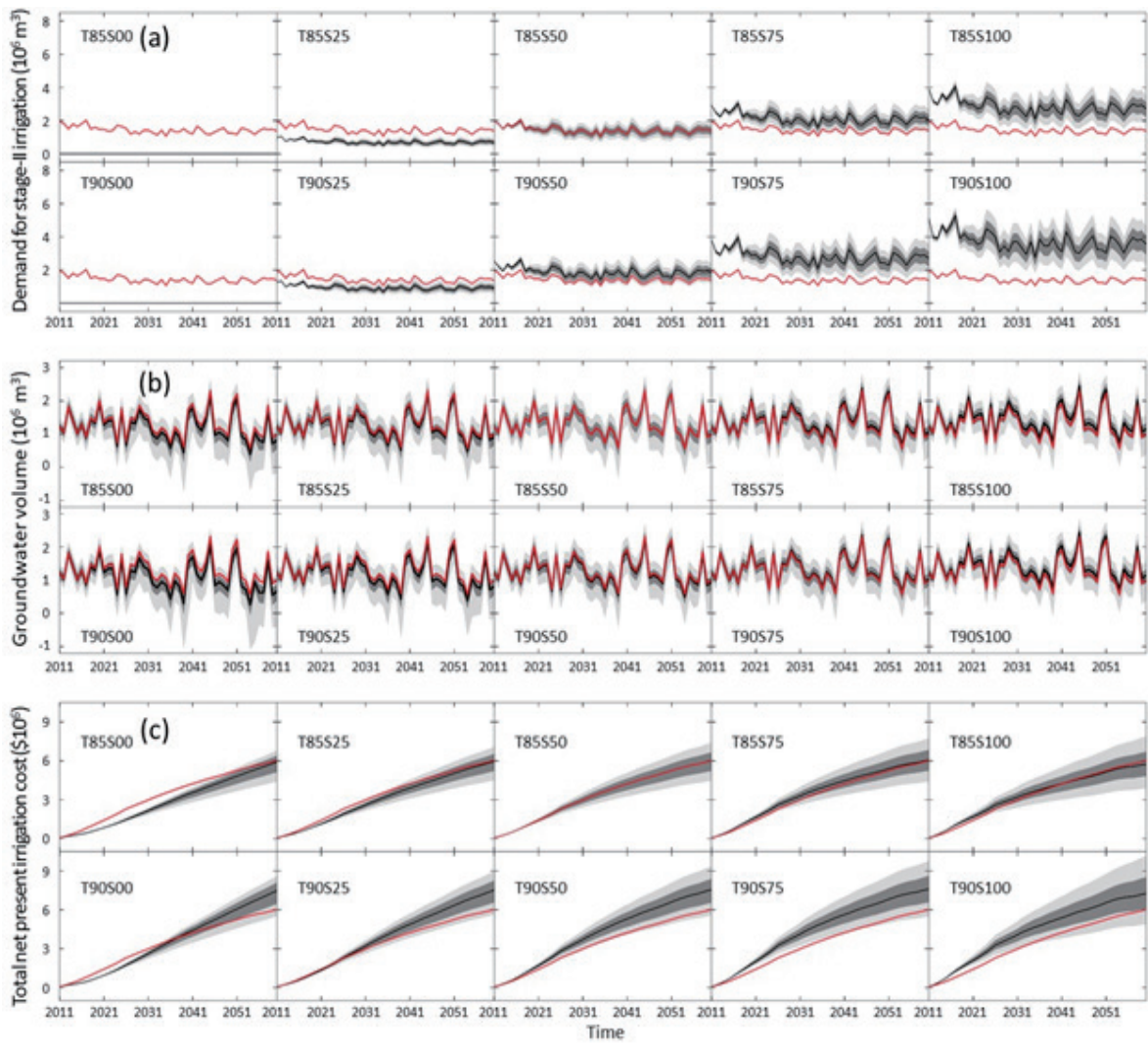


그림2. 하수재이용 수준에 따른 사회수문시스템의 확률공간 예. (a), (b), 그리고 (c)는 각각 하수재이용 수요량, 지하수량, 그리고 총순환개비용에 대한 확률공간이다 (Jeong 등 (2020)에서 편집).

소했는지에 관심을 두기보다, 어떠한 시스템 조건에서 하천유량의 가능한 변화를 탐구하는 것에 더 큰 관심을 둔다는 것을 의미한다. 이와 같은 이유로, Sivapalan과 Blöschl (2015)은 확률공간 (possibility space) 개념을 통해 사회수문시스템의 미래를 예측할 것을 권고한 바 있다. Jeong 등 (2020)은 Monte-Carlo 기법을 이용하여, 주요매개변수들의 불확실성을 고려한 확률공간을 예측한 바 있다(그림 2).

3. 사회수문학의 가능한 미래: Use-Inspired Science

사회수문학은 통합수자원관리를 가능하게 하는 과학으로 제안되었다. 그럼에도 불구하고, 통합물관리를 위한 실제적 학문으로서 여전히 의문이 남는다. 그것은 지금까지 개발된 다양한 사회수문시스템 프레임워크 또는 모형들이 실제 수자원관리에서 필요로 하는 공학적 문제에 대한 실효적 해

답을 제공하는 데 한계가 있기 때문일 것이다. 예를 들어, 통합물관리에 있어서는 5년, 10년, 그리고 20년 후의 물 이용량, 유량 및 수질 등을 예측하는 것이 중요하지만, 사회수문학 또는 사회수문모형에 있어서는 50년, 100년 “동안”의 사회시스템과 수문시스템의 공진화 과정을 “이해”하는 것이 중요하다. 창발적 현상의 이해만으로는, 또는 전통적 수문모델링기법으로는 불가능했던 수문사회적 현상의 모의만으로는 실제 물환경관리 문제를 해결하는 데 도움을 주기에는 한계가 있는 것이다.

통합물관리를 가능하게 하는 실제적 도구로서

사회수문시스템 프레임워크를 공학 프레임워크와 일반 프레임워크로 이원화하면 상기의 한계를 극복하는 데 도움을 줄 수 있다(그림 3). 일반 사회수문시스템 프레임워크와 공학 사회수문시스템 프레임워크의 차이는 사회 규범으로 표현되는 장기간의 사회민감성 변화를 가치-신념-규범 이론으로 모형화하는 과정의 포함 여부이다. 사회수문시스템은 크게 수문시스템, 사회간접자본시스템, 물관리시스템, 그리고 전체시스템의 유인동기로서의 수요시스템으로 구성되며, 수요시스템은 프레임워크의 종류에 따라 가치-신념-규범 이론과 상

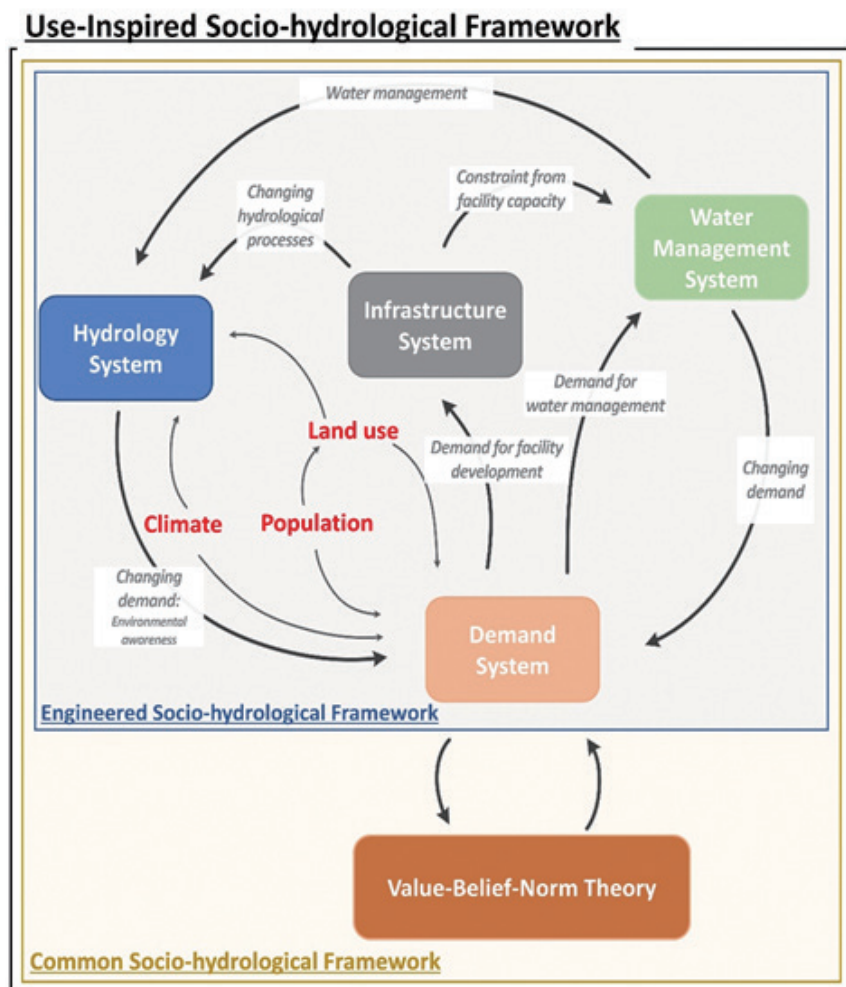


그림3. 통합물관리에서 활용할 수 있는 사회수문시스템 프레임워크의 예. 공학과 일반 사회수문시스템 프레임워크로 구분되며, 가치-신념-규범 이론의 모형화 과정 포함 여부로 두 프레임워크를 구분한다.

호작용할 수 있다. 일반 사회수문시스템 프레임워크는 가치-신념-규범 이론을 결합한 수요시스템의 구성을 통해 장기간에 걸친 사회시스템의 인식과 규범의 변화를 탐구함으로써 물관리방안이 사회시스템과 공진화해가는 과정을 이해함과 동시에 수자원정책에 대한 통찰을 제공하는 것을 목적으로 한다. 반면, 공학 사회수문시스템 프레임워크는 가치-신념-규범 이론으로 표현되는 사회시스템의 변화과정을 시나리오 접근방법을 통해 상수화함으로써 수요시스템의 변화과정을 단순화하여 물관리방안의 적용을 통한 사회경제적, 수문학적 영향 등과 같은 관심 시스템의 영향을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

일반 사회수문시스템 프레임워크가 주요 사회수문시스템 변수들(예: 기후 변동성, 토지이용변화, 수자원 경제성 등)의 가능한 변화를 고려하여 공진화해가는 사회수문시스템의 확률공간을 “이해”하기 위한 접근법인 반면, 공학 사회수문시스템 프레임워크는 가능한 미래 물관리정책 시나리오에 따른 특정 사회수문시스템의 반응을 “예측”하기 위한 접근법으로 생각할 수 있다. Sivapalan 등 (2012)은 통합수자원관리와 사회수문학의 차이를 설명하면서, 시나리오 기반 접근방법의 포함 유무도 기술한 바 있다. 하지만, 상대적으로 단기(10-20년)에 걸친 사회수문시스템의 확률공간 예측을 통해 통합물관리에 활용하기 위해서는 정책측면에서의 있음직한 미래에 대한 시나리오가 필요하다. 이를 통해, 공학 사회수문시스템 프레임워크는 기존 통합수자원관리에서는 어려웠던 사회시스템과의 상호작용에 따른 수문시스템의 동태적 경계조건(dynamic boundary conditions)을

미래 예측에 고려할 수 있는 큰 장점을 가지게 된다. 이는 기존의 다양한 모델링 기법에서 구현하기 힘들었던 수문시스템을 둘러싼 다양한 환경조건의 동태적 변화를 고려하여 수문학적 영향 및 경제성 평가를 가능하게 함을 의미한다.

4. 나오며: 사회강수를 상상한다

사회수문학을 통합물관리에 실제적으로 이용하는 데에는 여전히 큰 도전들이 남아있다. 사회수문학 분야의 선도 연구자들이 언급한 바와 같이, 기존 수문모형과 같은 일반 사회수문모형을 구현하는 것이 난제이기 때문이다(Konar 등, 2019). 또한, 하나의 프레임워크에서 다양한 수문현상(예: 홍수, 가뭄, 수질)과 수자원을 둘러싼 갈등을 표현하는 것은 지나친 기대일 수도 있다. 더욱이 통합물관리를 위한 공학적 해답을 얻기 위해 사회수문모형을 상세화하다 보면, 간단한 모형(즉, stylized model) 구성으로 우리가 그동안 전통적 수문모형으로 예측할 수 없었던 창발적 현상을 이해하는 것이 어려워지며, 이는 결국 Troy 등 (2015)이 제기했던 일반성(generality), 현실성(realism), 그리고 정밀도(precision)¹⁾ 사이의 절충점(tradeoff)을 찾아야 하는 또 다른 어려운 문제가 된다. 그럼에도 불구하고, 수문학자를 포함한 물과 연계된 시스템을 연구하는 사람들이 사회수문학으로 통합물관리를 들여다보는 연습을 해야 한다. 이를 위해서는 물을 연구하는 사회과학자들(hydrosocial studies)과 보다 긴밀히 공조하는 작업이 필요할 것이다(Ross와 Chang 2020). 더 나아가 사회시스템을 통해 수문시스템에 유

1) 여기서는 정확도가 더 맞는 표현이라고 하겠다.

효한 변화 또는 반응을 야기하는 사회강수(social precipitation)는 무엇일지 상상해야 한다. 물을 연구하는 우리가 하지 않으면 대신해 줄 사람이 없기 때문이다.

참고문헌

- 김연주, 정은성, 2015. 사회-수문학(Socio-hydrology) 혹은 수문사회학(Hydro-sociology): 인간과 물 순환과의 상호진화 연구. 물과미래, 제48권, 제7호, 34-43.
- Blair, P., Buytaert, W., 2016. Socio-hydrological modelling: A review asking “why, what and how?” Hydrol. Earth Syst. Sci. 20(1), 443–478.
- Chang, H., Yu, D., Markolf, S., Hong, C., Eom, S., Song, W., Bae, D., 2021. Understanding Urban Flood Resilience in the Anthropocene: A Social-Ecological-Technological Systems (SETS) Learning Framework. Annals of the American Association of Geographers (in press).
- Chen, X., Wang, D., Tian, F., Sivapalan, M., 2016. From channelization to restoration: Sociohydrologic modeling with changing community preferences in the Kissimmee River Basin, Florida. Water Resour. Res. 52, 1227–1244.
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Vstt, H., Kuil, L., Salinas, J. L., Blöschl, G., 2013. Sociohydrology: conceptualising human-flood interactions. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 3295–3303.
- Elshafei, Y., Coletti, J. Z., Sivapalan, M., Hipsey, M. R., 2015. A model of the socio-hydrologic dynamics in a semiarid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system. Water Resour. Res. 51, 6442–6471.
- Elshafei, Y., Sivapalan, M., Tonts, M., Hipsey, M. R., 2014. A prototype framework for models of socio-hydrology: identification of key feedback loops and parameterization approach. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 2141–2166.
- Elshafei, Y., Tonts, M., Sivapalan, M., Hipsey, M. R., 2016. Sensitivity of emergent sociohydrologic dynamics to internal system properties and external sociopolitical factors: Implications for water management. Water Resour. Res. 52, 4944–4966.
- Jeong, H., Bhattarai, R., Adamowski, J., Yu, D. J., 2020. Insights from socio-hydrological modeling to design sustainable wastewater reuse strategies for agriculture at the watershed scale. Agric. Water Manag. 231, 105983.
- Konar, M., Garcia, M., Yu, D. J., Sanderson, M., Sivapalan, M., 2019. Expanding the scope and foundation of sociohydrology as the science of coupled human-water systems. Water Resour. Res. 55, 874–887.
- Pande, S., Sivapalan, M., 2017. Progress in socio-hydrology: A meta-analysis of challenges and opportunities. WIREs Water 4(4), 4, e1193.
- Roobavannan, M., van Emmerik, T., Elshafei, Y., Kandasamy, J., Sanderson, M., Vigneswaran, S., Pande, S., Sivapalan, M., 2018. Norms and values in sociohydrological models. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 1337–1349.
- Ross, A., Chang, H., 2020. Socio-Hydrology with Hydrosocial Theory: Two Sides of the Same Coin? Hydrol. Sci. J. 65(9), 1443-1457.

Sivapalan, M., Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.* 51, 6988–7022.

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., 2012. Socio-hydrology: a new science of people and water. *Hydrol. Process.* 26 (8), 1270–1276.

Stave, K. A., 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *J. Environ. Manage.* 67, 303–313,

Troy, T. J., Pavao-Zuckerman, M., Evans, T. P., 2015. Debates—perspectives on socio-hydrology: socio-hydrologic modeling: tradeoffs, hypothesis testing, and validation. *Water Resour. Res.* 51 (6), 4806–4814.

Yu, D. J., Sangwan, N., Sung, K., Chen, X., Merwade, V., 2017. Incorporating institutions and collective action into a sociohydrological model of flood resilience. *Water Resour. Res.* 53, 1336–1353.

Yu, D. J., Chang, H., Davis, T. T., Hillis, V., Marston, L. T., Oh, W. S., Sivapalan, M., Waring, T. M., 2020. Socio-hydrology: an interplay of design and self-organization in a multilevel world. *Ecol. Soc.* 25(4):22.