

01

독단적이지만 합리적이며 변칙적이지만 체계적인 관개의 복잡계



송철민
충북대학교
/ 조교수
song_c_m@chungbuk.ac.kr



송석호
충북대학교
/ 박사과정
seokho@chungbuk.ac.kr

1. 머리말

농업에서의 물관리는 건조한 땅에 물을 공급하거나 물이 많은 땅에는 물을 배제하여 작물의 성장이 원활하게 이루어지는 방법을 사용하는 바와 같이 매우 단순한 원리에 근거하여 행해진다. 또한, 물이 부족할 때를 대비하기 위해 물을 모아놓기도 하며, 물이 많을 때를 대비하기 위해 물이 잘 지나갈 수 있도록 물길을 정비하는 등의 물의 이치(理致)를 이용하기도 한다. 이러한 일련의 행위는 현 인류사의 시작부터 지금까지 지속적으로 해왔던 일들이며, 현재에도 걸모습만 바뀌었을뿐 가까운 농촌에서 이와 유사한 물을 다루는 행위를 쉽게 볼 수 있다. 물은 때때로 인류의 생존을 위협하기도 하고, 인류의 영속에 도움을 주기도 했다. 특히, 작물 생산에 직접적인 영향을 끼치는 물은 농업에서는 매우 치명적으로 작용하거나, 신의 은총으로 생각할 정도로 커다란 유익한 요소로 다가오기도 했다. 거대한 인류의 경험은 비단 생존을 위한 본능이 아니더라도 물이 가진 권능을 인류 DNA에 각인시켰고, 물을 다루는 것을 게을리하지 않도록 하였다. 인류는 어떻게 서든 물을 가까이 또는 멀리 적당한 거리를 유지하면서 곁에 두고자 수많은 노력을 해왔으며, 그 노력의 산물은 현재 곳곳에 숨어있기도 하고 이 글을 읽는 독자의 주변에 존재하기도 한다.

술한 경험을 가진 인류는 현재에도 물을 완전히 정복하지 못한 채 물을 다스리기 위한 완벽한 방법을 찾아 헤매고 있다. 특히, 지속가능한 농업을 영위하기 위해 물관리에 관한 질문을 끊임없이 자신에게 던지고 있다. 왜 인류는 매우 단순한 원리로 거동하는 물을 정복하지 못하고 그 해답이 나타나길 기다리거나 찾아내길 갈망하고 있을까? 이 글을 읽는 대부분의 물 관련 전공자는 크거나 작거나 또는 매우 자세한 이유를 대며 물을 다스리

지 못하는 불가능성에 관한 이유를 백만 가지를 딸 것이다. 그렇다면 질문을 바꾸어 '수만 가지 이유를 알면서 왜 해결하지 못하는가?'라는 질문에는 답을 할 수 있을까? 질문의 방향이 어찌 되었던 질문이 발현되면 명확한 대답을 할 수는 없을 것이다. 간단한 물의 이치를 알고는 있지만 그 거대한 힘을 정복하는 것은 자연에 대한 도전-매우 상투적인 표현이기는 하지만-인 것이 자명하기 때문이다. 그렇다면 우리는 자연과의 싸움을 피해야 하는 것일까? 지금까지 인류가 성취해 온 결과를 보면 그렇지는 않다는 답은 충분히 예견할 수 있다.

물의 조리(條理)는 현재 인류의 지식수준에서 바라보았을 때 원시적 개념으로 취급될 수 있으며, 이를 잘만 이용한다면 물 문제에 대해 순간순간 원하는 수준의 해결책을 도출할 수 있을 것으로 생각할 수 있다. 이와 관련하여 인류는 자연에서 벌어지는 현상을 예측하기 위해 예로부터 태양의 위치나 별자리의 변화 또는 달의 움직임을 관찰해 왔으며, 그 결과로 '날짜 결정 체계'(역법, calendar)라는 자연을 예측하는 모형-어쩌면 그럴싸한 인류 최초 모형일 수 있는-을 개발했으며, 이를 농업에 적극적으로 활용해오고 있다. '물의 조리를 알기 위해 역법까지 개발했다.'라는 사건의 연결이 억지일 수 있겠지만, 이를 되짚어 보면 결국은 물의 전 지구적 흐름을 알기 위해 시간을 사용한 것이고, 각 시간과 물의 이정표를 기록한 것이 결국은 역법으로 표현되었다고 해도 과언은 아닐 것이다.

사실 여러 역사학자에 의해 물의 이치에 관한 연구는 고대부터 행해져 왔을 것으로 추측되고 있는데, 고대 메소포타미아 지역에서는 티그리스(Tigris)와 유프라테스(Euphrates)강의 관리 및 제어를 통해 농업을 지속하고자 한 것으로 알려져

있으며, 고대 이집트에서는 나일강의 홍수와 물 흐름의 관측을 통해 농업 생산성을 향상하고자 했다. 인더스에서는 물을 공급하기 위한 선진적 시스템을 개발한 사례가 있으며, 로마제국은 여러 도시에 물을 공급하기 위한 수도 시스템을 구축한 바 있다. 이러한 일련의 사건에서 발생한 지식은 근대와 현대를 거쳐 물 관련 학문인 유체역학, 수문학 및 수리학 등의 발전을 위한 기틀이 되었고, 이는 다시 수치 모형 개발로 이어져 현재 물 관련 분야에서 목적에 따른 역할을 수행하고 있다. 이에 더하여 근래에는 AI의 발전이 급격하게 이루어져 관련 이론이 물 분야에도 접목되고 있으며 효율성이 높은 모형이 개발되는 등 수많은 선행연구보다 개선된 연구가 수행되고 있다. 일반적으로 모형이라는 것은 흔히 알려져 있듯이 자연적 현상이나 물리적 현상을 수학적으로 간단히 나타내고 변수의 조건을 달리하여 그 결과를 추정하는 방법론을 사용한다. 여기서 모형 개발의 기본 방향은 원인과 결과의 복잡한 관계를 단순화하는 것으로 말할 수 있으며, 모형에서 도출되는 결과는 정해에 근사하는 방향으로 설계된다. 이러한 방법을 통해 인류는 수많은 현실적인 문제를 해결해 왔으며 우리 사회에도 깊숙이 스며들어 다양한 분야에서 긍정적 해결책을 제시하고 있다.

아마도 한편에서는 앞서 언급한 바와 같이 수치 모형과 농업에서의 물관리는 단순하다는 특성이 공통분모라는 점을 근거로, 농업에서 예견되는 물 관리 문제에 대한 해결책을 수치 모형을 이용하여 타당하고 합리적이며 적합하게 도출할 수 있다는 순진한 생각을 할 수도 있을 것이다. 하지만 그렇지 못하다는 것이 현실이다. 수치 모형은 일부 측면에서 함정 또는 한계를 가지고 있다. 이는 복잡한 원인과 결과를 단순화하여 긍정적 효과를 도출하는 것이 모형의 가장 큰 특징이라고 언급한 것

과 배치되는 주장이며 동시에 모순될 수 있는데, 모형이 가지는 함정 또는 한계라 함은 실제 자연 상태에서 발생하는 현상을 단순화시킴에 따라 현실에서의 다양한 변수와 그 변수들이 서로 영향을 주고받는 부분을 고려할 수 없다는 의미다. 특히, 농업에서 발생하는 물 관리의 어려움이 이 영역에 해당하는 문제이며, 이 문제를 해결하고자 해도 관련 변수가 매우 많기 때문에 효과적인 답을 구하기도 어려우며, 구하였다 하더라도 정답에 근사하기는커녕 전혀 동떨어진 답을 내놓는 것이 허다하다.

2. 모형화가 어려운 농업에서의 물관리

인류가 고도로 발전된 사회에서 사는 것과 역설적으로 물을 다스리기 위한 명확하고 완전한 방법론은 도출되지 않았다고 말하는 것이 일반이라고 해도 과언이 아닐 것이다. 특히, 과거부터 수많은 실패와 방대한 노력에도 농업에서의 물관리는 모형으로 예측하기 어렵다는 것이 많은 전문가들이 공통적으로 느끼는 부분일 것이다. 물론 저수지로부터 관개수로로 공급되는 물의 양이나, 필지별로 공급하는 물의 양 등은 수치 모형 등으로 가능하고, 필지의 필요수량도 모의가 가능하다고 주장하는 전문가도 다수일 것이다.

본 고에서 언급하는 농업에서의 물관리가 모형으로 예측하기 어렵다고 하는 부분은 실제 관개수량을 의미한다. 물론 모형이라는 것이 정답에 근사하는 구조로 설계되었다고 하더라도 현재 수준을 기준으로 할 때에는 실제 관개수량과 모의 값 간의 차이는 매우 크다고 할 수 있다. 이에 대한 근본적인 원인이 무엇인가를 찾아보기 위해서는 영농활동의 생리나 농업에서 사용되는 물의 특성에 대해 이해가 필요하다. 영농활동의 기본 생

리는 작물 생산을 목적으로 하고 있다. 작물 생산이라는 것은 먹거리를 생산하는 것, 이외에 농가의 소득, 즉 경제적 이익을 확보하고자 하는 목적이 강하다. 이는 직·간접적으로 영농활동에서 발현되는데, 예를 들면 각 필지에 관개하는 과정에서 농민 간의 물 관련 다툼이 빈번히 나타남으로 알 수 있다. 이는 다시 물의 특성을 기반으로 접근해야 하는데, 본 고에서 언급하는 물의 특성은 물리·화학적 특성이 아닌 재화(財貨)의 성격을 의미한다. 농업에서의 물은 곧 재화라고 해도 지나치지 않는데, 이는 곧 작물 생산으로 이어지기 때문이다. 농업에서 적기 적소에 물 공급이 이루어지지 않는다면, 안정적 작물 생산을 보장받기 어려울 뿐만 아니라, 물 공급 시기를 놓치게 되면 생산량의 손실로 이어지기 쉽다. 이러한 이유로 농업에서의 물은 사재(私財)의 성격을 가지고 있다고 할 수 있지만, 우리나라에서는 농업에 사용되는 물의 비용을 농민이 부담하고 있지 않은 것이 대부분이기 때문에 물을 공공재(公共財)로 보는 시각도 상당하다. 물론 엄밀히 말하면 물은 공공재임은 분명하지만, 농업에서만큼은 사재로 봐야 하는 부분도 존재함은 인정해야 한다.

이러한 농업에서의 물의 특성 때문에 관개가 어떠한 규칙성을 가지고 공급된다는 것은 실제 현장에는 어울리지 않는 개념이며, 더욱이 이 특징 때문에 모형화로 이어지기는 더더욱 어렵다. 특히, 현장에서는 농민에게 효율적인 물관리를 요구하고 있으나, 실제 현장에서는 농민에 의한 물관리가 이루어지지 않는데, 그 이유는 농민이 직접 관개하는 입장에서 물을 바라보는 시각이 시시때때로 공공재와 사재 사이를 오가기 때문이다. 이에 더하여 현재 물을 공급하는 책임은 국가에 있기에 국가가 그 책임을 다하여 물 공급을 했다 하더라도 농민 본인의 필지에 물 공급이 이루어지지 않

+ 특집 | 독단적이지만 합리적이며 변칙적이지만 체계적인 관계의 복잡계

는다면, 또는 책임소재를 법적으로 판단하여 그 책임이 농민에게 있다고 하더라도 대부분의 비난은 정부로 향할 수밖에 없는 사회적 구조에 놓여 있다. 이와 같이 아이러니한 현실적인 문제로 인해 농업에서의 물관리는 분명 한계가 존재함을 인정할 수밖에 없다. 정부가 아무리 물관리를 하고 싶어도 농업에서 물이 가지는 공공재와 사재의 성격을 정확히 구분하지 않는다면, 실제 물관리를 불가능하며 더욱이 단순화한 모형으로 이 문제를 해결하기에는 해결방안 도출은커녕 물관리가 엉뚱한 방향으로 흘러갈 수밖에 없다.

3. 관계의 복잡성과 복잡계

농업에서의 물관리는 농민 개개인의 성향과 그 자신들만의 물관리 방법에 의존하게 된다. 간선에서 아무리 물 공급을 충분히 해도 최종 수요자인 필지에서 관계를 비효율적으로 수행한다면 간선에서의 물관리는 공허로 돌아갈 수밖에 없다.

이러한 측면에서 본 고에서는 이 문제를 관계의 복잡성(complexity)과 복잡계(complex system)로 칭하고자 한다. 복잡성이라는 용어는 시스템을 구성하는 다양한 요소 간의 상호작용이나 연결로 인해 시스템의 메커니즘을 이해하기 어려운 정도를 나타낸다. 이는 여러 요소가 서로 얽혀있어 단순한 원인과 결과의 관계로 설명하기 어렵다는 것을 의미한다. 다른 의미로의 복잡성은 질서와 혼잡 사이의 어딘가를 나타낸다고 할 수 있으며, 수치 모형의 단순화와는 반대되는 표현으로 나타낼 수 있다. 이러한 복잡성의 특징은 아래와 같이 6개의 항목으로 구분하여 설명할 수 있다.

- 다양성:

시스템 내의 다양한 부분, 구성 요소, 또는

변수들의 다양성이 많을수록 복잡성이 증가하고, 이들 간의 다양한 연결과 상호작용은 예측을 어렵게 만들.

- 상호연결성:

시스템 내의 부분들이 상호 작용하면서 변화할 때, 하나의 부분의 변화가 전체 시스템에 영향을 미칠 수 있음. 이는 예측을 어렵게 만들며, 작은 변화가 큰 파급효과를 일으킬 수 있는 특징이 있음.

- 동적 복잡성:

시간이 지남에 따라 시스템의 구조나 특성이 변할 때 동적 복잡성이 발생하며, 이는 미래의 상태를 예측하기 어렵게 만들.

- 비선형성:

시스템 내에서 변수 간의 관계가 선형이 아닌 경우, 비선형성이 발생하는데, 이는 예측 모형을 구축하거나 시스템 동작을 설명하는데 어려움을 줄 수 있음.

- 불확실성:

외부 환경의 불확실성, 초기 조건의 불확실성, 또는 시스템 내부의 불확실성 등이 복합적으로 작용할 때, 시스템은 예측하기 어려운 불확실한 특성을 가진.

- 자기조직화와 실시간 상호작용:

일부 시스템은 자체적으로 조직화하거나 현재의 상태에 따라 실시간으로 상호작용할 수 있으며, 이는 예측이나 통제를 어렵게 만들.

농업의 관계 시스템은 앞서 언급한 복잡성을 가지고 있어, 복잡성을 가지는 시스템인 복잡계로 표현할 수 있다. 그 근거로 평야부의 관계시설 특징을 보면 복잡한 그물망처럼 관개수로와 배수가 설치되어 경우가 많다. 특히, 관개용수가 공급되는 필지는 필지의 소유자인 농민에 의해 관개되

므로 각 필지는 독립체 형태를 나타내고 있어, 관개용수량을 산정하기에 매우 어려운 조건에 놓여 있다. 이러한 이유로 본 고에서는 농업의 관개 시스템을 복잡계로 표현하고 있다. 이와 같은 복잡계는 복잡성과 유사하게 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

• **다수의 상호작용하는 구성 요소:**

복잡계는 많은 개별적인 요소로 이뤄져 있으며, 이 요소들은 서로 다양하게 상호작용하며 네트워크 형태로 연결되어 있음.

• **비선형성:**

복잡계는 일반적으로 비선형이며, 입력과 출력 간의 관계가 직선적이지 않음. 작은 변화가 큰 영향을 미칠 수 있다는 특징을 가짐.

• **동적 복잡성:**

시간에 따라 시스템이 변하는 동적인 특성을 가짐. 이는 현재 상태와 미래 상태 간의 관계를 복잡하게 만들.

• **불확실성:**

초기 조건이나 외부 환경의 변화에 민감하여 불확실성을 내포하고 있으며, 작은 불확실성이 큰 결과를 가져올 수 있음.

• **자기조직화:**

복잡계는 상호작용하는 부분들 간의 조직화 혹은 패턴 형성이 가능한 경향이 있음.

• **비분리성:**

복잡계는 각 부분이 분리돼서 이해하기 어려우며, 전체 시스템의 특성은 각 부분의 합으로 설명되기 어려움.

사실 지금까지 복잡계로 이루어진 농업에서 물관리가 이루어졌다는 의미는 실제로 요구되는 물의 양보다 더 많은 양을 공급했거나 물관리 주체

의 각고 노력이 만들어낸 결과로 평가할 수 있다. 하지만 이제는 농업 인구 감소와 같은 국내 여건의 변화나 기후변화로 인해 점차 기존의 물관리 방식은 더 이상 통하지 않는 날이 다가올 것이며, 정밀 농업이라는 요즘 흐름에는 맞지 않는 물관리 방식임에 따라 새로운 물관리 대응 방안 마련이 시급하다.

4. 관개의 복잡성 및 복잡계 극복 방안

관개의 복잡계를 극복할 수 있는 방법론은 인문·사회적 접근방법과 공학적 접근방법으로 구분하고 제안할 수 있다. 인문·사회적 접근방법은 지역사회 참여 및 협력과 지속가능한 농업을 위한 정책 개발, 교육과 인식 제고, 그리고 환경 변화에 대한 대응 및 문화적 측면에서의 접근 등으로 설명할 수 있다. 지역사회의 참여와 협력은 지역 농민 및 농업 전문가와의 협력을 강조하고 지역사회 참여를 유도하여 지역적 물 사용 방법 및 관리 방안을 모색하는 것을 의미하며, 지속가능한 농업을 위한 정책 개발은 정부와 이해 당사자가 참여하여 농업 정책 개발하고 물관리 정책을 촉진시키는 것을 말한다. 교육과 인식 제고는 물관리 중요성과 혁신적 방법을 교육함으로써 물관리의 중요성을 설파하여 실천으로 이행되는 결과를 도모하는 것을 의미한다. 또한, 환경 변화에 대응과 문화적 측면도 역시 물관리 주체의 인식변화에 기인하는 방법론을 의미한다.

공학적 접근방법은 AI 기반의 해결 방법을 마련하는 것이다. 복잡계에 적용 가능한 알고리즘으로는 강화학습(reinforcement learning)을 제안할 수 있다. 강화학습은 특히 복잡하고 동적 환경에서 의사 결정을 내리고 행동을 학습하는 데에 유용한 기술로 인정받고 있다. 강화학습은 다양한

+
특집 | 독단적이지만 합리적이며 변칙적이지만 체계적인 관계의 복잡계

상태에서 어떠한 행동이 최적인지 학습하고, 시간이 지남에 따라 최적의 행동을 조정하는 방법을 찾아내는 특징을 가진다. 이는 복잡한 시스템에서 발생하는 다양한 변수들과 상호작용에 대처하는 데에 도움을 줄 수 있다. 여러 이유로 강화학습이 복잡성을 극복하는 데에 유용할 수 있다. 다음은 복잡계에 적용되는 강화학습이 가지는 특징을 나 타낸다.

- **비선형 및 동적 시스템 모델링:**
강화학습은 비선형 및 동적 시스템에서도 적용이 가능하며, 환경이나 상태가 변하는 시스템에서도 적용할 수 있는 특성이 있음.
- **불확실성 대응:**
강화학습은 불확실성이 있는 환경에서도 효과적으로 작동할 수 있으며, 모델이나 환경의 불확실성을 감지하고 학습하여 현재의 환경에 적응할 수 있음.
- **자기조직화:**
일부 강화학습 알고리즘은 환경과의 상호작용을 통해 자기조직화 되는 경향이 있어, 복잡한 시스템에서 유연하게 대처하는 데에 도움이 됨.
- **대규모 데이터 처리:**
강화학습은 대규모 데이터를 처리하고 학습하는 데에도 효과적이며, 복잡한 시스템에서 다양한 상황(상태)을 경험하며 행동을 학습하는 데에 유리함.

이와 같이 강화학습의 특징은 매우 강력하나 여전히 해결되어야 할 도전과제가 존재한다. 특히, 학습에 필요한 많은 데이터와 계산 리소스, 그리고 모델의 해석 가능성 등에 대한 문제들이 있다. 또한, 몇몇 복잡한 문제에서는 강화학습만으로는

한계를 가질 수 있다. 따라서 다른 기술과의 융합이나 보완적인 방법을 사용하여 복잡성을 극복하는 것이 효과적일 수 있다.

5. 심층 강화학습(deep reinforcement learning) 관련 알고리즘

심층 강화학습은 강화학습 기술에 심층 신경망을 통합한 형태로, 복잡계의 다양한 문제에 대한 해결책을 제시하는 데 강력한 도구로 작용할 수 있다. 아래는 복잡계를 극복하기 위한 몇 가지 주요한 심층 강화학습 알고리즘에 대한 간략한 소개이다.

- **Deep Q-Networks (DQN):**
DQN은 강화학습의 대표적인 알고리즘 중 하나로, 심층 신경망을 사용하여 상태-행동 공간에서 Q-값을 근사화 함. Experience Replay와 Target Network를 통해 학습 안정성을 향상시키고, 복잡한 환경에서도 높은 성능을 나타냄.
- **Policy Gradient Methods:**
심층강화학습에서 정책 경사 알고리즘은 정책을 직접 최적화하여 학습함. Proximal Policy Optimization (PPO)와 Trust Region Policy Optimization (TRPO)는 안정적이고 성능이 우수한 정책 경사 알고리즘으로 알려짐.
- **Actor-Critic Methods:**
Advantage Actor-Critic (A2C) 및 Trust Region Actor-Critic (TRAC)과 같은 알고리즘은 정책과 가치함수를 함께 사용하여 학습함. 이들은 신경망을 사용하여 환경과 상호작용하며 정책과 가치함수를 업데이트하여 학습의 안정성을 향상시키는 장점이 있음.

- Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG):
DDPG는 연속적인 행동 공간에서 작동하는 알고리즘으로, 심층 Q-네트워크와 정책을 사용하여 학습함. 경험 재생과 target 네트워크를 활용하여 안정성을 향상시키고, 로봇 제어 및 제어 문제에 적합함.
- Multi-Agent Reinforcement Learning: Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient (MADDPG)와 같은 다중 에이전트 강화학습 알고리즘은 여러 에이전트 간의 협력 또는 경쟁을 통해 복잡한 상호작용 문제를 해결함.
- Hierarchical Reinforcement Learning: 계층적 강화학습 알고리즘은 여러 수준의 추상화를 사용하여 문제를 해결하며, H-DQN, Option-Critic Architecture 등이 있음.

이러한 알고리즘은 심층 강화학습의 발전과 함께 다양한 분야에서의 응용이 확대되고 있으며, 실제로, 이러한 알고리즘들은 게임, 제조업, 로봇 공학, 금융 등 다양한 분야에서의 문제 해결에 적용되고 있다.

6. 마치면서

농업에서의 관개는 농민 개개인의 성향과 그 자신들만의 물관리 방법에 의해 결정되는 구조로 이루어지고 있다. 그러한 연유로 기존의 물관리 주체가 간선에서 아무리 효과적으로 물 공급 수행해도 최종 수요자인 필지에서의 관개를 비효율적으로 수행한다면 간선에서의 물관리는 무용지물이 될 수밖에 없다.

본 고에서는 이러한 문제를 관개의 복잡성과 복잡계로 정의하였으며, 극복의 대상으로 설정하였다. 이에 대한 이유로 관개의 복잡성과 복잡계를 극복하여 효과적인 물관리를 달성하고자 할 뿐만 아니라 미래 농업과 기후변화를 대비함에 있다. 이에 대한 방안으로는 인문·사회적 접근방법과 공학적 접근방법을 제시했으며, 가장 이상적인 방법으로 강화학습을 소개하고, 이와 관련된 여러 심층 강화학습 알고리즘을 나열하였다.

본고는 심층 강화학습이 물관리를 위한 새로운 방법론으로 충분하다고 믿고 있으며, 보다 미래지향적이며 향후 발생할 수 있는 여러 복잡한 문제를 해결할 수 있다고 생각하고 있다. 이에, 물을 공부하는 여러 연구자들이 도전을 두려워하지 말고 많은 관련 연구가 이루어져 첨단 농업을 개척할 수 있는 교두보가 되길 희망한다.

참고문헌

1. 마빈 민스키, 2019, 마음의 사회, 서울: 새로운 현재
2. 이상원, 2022, 인공지능과 뇌는 어떻게 생각하는가, 서울: 숲