

AI 등 4차 산업혁명 기술 시대의
물관리 방안 연구

2024년 7월

감 사 원

임 범 목

- 목 차 -

국외 훈련 개요	1
훈련기관 개요	2
1. 서론	3
2. 한국의 물관리 현황	7
3. 한국의 AI 등을 활용한 물관리 현황	10
4. AI를 활용한 물관리 활용 연구추세	14
5. AI를 활용한 수위에측 모델	19
6. AI를 활용한 수질 관리·평가 모델	30
7. 미국의 기후변화 대응 물관리 예측	39
8. 한국과 미국의 스마트워터그리드	44
9. 물관리 방안에 대한 AI 도입의 일반적 한계	47
10. 결론	49
참고문헌	51

국외 훈련 개요

1. 훈련국: 미국
2. 훈련기관명: 글로벌문제연구센터(Center for the Study of Global Issues, University of Georgia)
3. 훈련명: AI 등 4차 산업혁명 기술 시대의물관리 방안 연구
4. 훈련기간: 2023. 12. 28. ~ 2024. 6. 25.

훈련기관 개요

1. 명칭: 글로벌문제연구센터(Center for the Study of Global Issues, University of Georgia)

2. 소재지: 미국 조지아주 아테스

3. 인터넷 웹주소: <https://spia.uga.edu/departments-centers>

4. 설립목적

- 1994년 글로벌 이슈에 대한 교육과 연구활동을 촉진하기 위한 목적으로 조지아주립대학교 내에 설립
- 조지아주립대학교 내 17개 대학과 글로벌 문제에 대한 다양한 프로젝트 지원

5. 조직

- 교수 및 직원 9명
- Certificate in Global Studies Program (4개 분야)
- Study Abroad Programs (영국, 이탈리아, 아이랜드 등 7개국 9개 프로그램)
- International Initiatives (3개 분야)
- Global Leadership and Development Program (2개 분야)

1. 서론

세계는 4차 산업혁명이라는 거대한 흐름의 가운데에 있다. 스위스의 경제학자인 클라우스 슈밥(Klaus Schwab)은 2016년 4차 산업혁명을 “디지털, 물리적 및 생물학적 시스템 사이의 통합을 기반으로 한 혁명”으로 정의하였고, “4차 산업혁명은 디지털 기술의 진보, 인공지능, 로봇공학, 자율 주행 자동차, 빅데이터(Big Data), 사물인터넷(IoT), 생명공학 등 다양한 기술 영역을 아우르는 것”으로 “이러한 기술들이 서로 융합하여 새로운 혁신”을 이끌고 있으며, 사회, 경제, 정치, 문화 등 다양한 측면에 광범위한 영향을 미치고 있다고 주장¹⁾하였다.

그리고 우리 정부는 2017년 발표한 ‘4차 산업혁명 대응계획’에서 4차 산업혁명을 “인공지능, 빅데이터 등 디지털 기술로 촉발되는 초연결 기반의 지능화 혁명”이라 표현하고, 이는 산업뿐만 아니라 “국가시스템, 사회, 삶 전반의 혁신적 변화를 유발”하고 있다고 설명하였고, “초연결 기반의 지능화 혁명을 통해 이 사회의 모든 것들이 네트워크에 연결(초연결)되어 데이터가 폭발적으로 증가”하고, 인공지능이 이를 스스로 학습하여 육체 노동뿐만 아니라 지적 판단기능도 수행 가능할 것으로 보고 있으며, 이러한 변화는 네트워크(IoT, 5G), 데이터(Cloud, Big Data), 인공지능 SW(기계학습, 알고리즘) 등 지능화 기술이 핵심 동인으로 이러한 지능화 기술이 각 분야의 기반기술과 융합하여 범용으로 영향을 미치게 되는 것으로 해석하고 있다²⁾.

이러한 급격한 변화가 나타나고 있는 4차 산업혁명에서 가장 핵심적인 기술로 인공지능(AI: Artificial Intelligence)을 들 수 있다. 인공지능은 인간의 지적 능력(인지, 학습, 추론)을 기계 등에 인공적으로 구현한 것 또는 구현하는 기술로 컴퓨터 과학의 세부분야 중 하나이며, 정보공학 분야에 있어 하나의 인프라 기술이기도 하다.

인공지능은 지능 수준, 작업 유형, 응용 분야 등에 따라 다양한 유형으로 분류할 수 있다. 예를 들면, 특정한 한 가지 분야의 주어진

1) The Fourth Industrial Revolution(Klaus Schwab, 2016)

2) 혁신성장을 위한 사람 중심의 4차 산업혁명 대응계획(4차산업혁신위원회, 2017)

일을 인간의 지시에 따라 수행하는 인공지능은 약인공지능(Weak AI), 포괄적인 영역에서 적용되는 인공지능, 즉 인간처럼 생각하고 판단할 수 있도록 인간의 지성을 컴퓨터의 정보처리능력으로 구현한 인공지능은 강인공지능(Strong AI)으로 분류할 수 있고, 작업 유형에 따라 지식 기반 인공지능, 머신러닝 기반 인공지능(AI), 딥러닝 기반 인공지능으로 분류할 수 있으며, 적용분야에 따라 자연어 처리 기반 인공지능, 컴퓨터 비전 기반 인공지능(AI), 자율주행 기술 등으로 분류할 수 있다.

인공지능 기술은 4차 산업혁명을 선도하는 주요 차세대 기술들과 더불어 인간의 삶과 관련된 거의 모든 분야에서 적용될 수 있고, 인간의 삶 자체를 변화시킬 수 있을 정도로 영향력이 클 것으로 예상된다. 따라서 인공지능 기술의 확보와 활용 능력이 국가, 기업의 경쟁력에 결정적인 요인이 될 뿐 아니라 국민의 삶의 질에 있어서도 중요한 요인이 될 것으로 인식되고 있다. 스마트 팩토리, 스마트 유통 등 기존의 산업 영역에 인공지능 기술을 접목하여 효율성과 전문성을 보장하는 방식이 빠르게 확산되었으며, 금융, 회계, 법률 등 전문적인 영역에서도 업무 고도화를 위해 인공지능 기술을 도입하려는 시도가 많아지고 있다.

행정 및 공공분야도 예외는 아니어서 민간분야만큼 적극적이고 빠른 움직임을 보이고 있지는 않지만 인공지능을 도입하고 활용하려는 노력을 기울이고 있다. 국제적, 국가적 난제(Wicked Problem)와 인적, 예산적 제약이 증가하고 있고, 행정이 점점 복잡해지고 있는 상황을 극복하기 위해 정책결정, 행정서비스 공급 등 행정 및 공공분야에 정부 혁신의 수단으로서 인공지능을 적용하여 변화를 이끌어내고자 노력을 기울이고 있다.

이처럼 전 세계적으로 디지털기술로 인한 정부 부문의 변화가 진행 중으로, UN E-Government Survey(2022)에 따르면 대부분의 국가에서 EGDGI 점수가 증가하는 등 디지털기술 의존도가 증가하고 있고, 각 정부는 코로나19 시기에 디지털기술을 코로나19 대응전략의 핵심요소로 활용하였으며, 정책조율 및 소통, 법정 절차, 의료, 복지, 신원확인 등에 인공지능 도입 및 사용을 확대하고 있다.

특히 2022년 현재 미국은 120개 미연방 기관, 부서와 기타 공공 기관 중에 45%가 인공지능이 적용된 공공 관리 도구를 시범 운영한 적이 있거나 현재 사용 중으로, 머신러닝 도구를 사용하여 규제 분석과 모니터링을 한다거나, 형사 사법적 분야의 얼굴인식이나 범죄 예측에 사용한 경우가 보고되었다. 또한 FDA(식품의약국)의 공중 보건을 위협하는 약물의 예측과 의약품 부작용 보고서 분석, DHHS(보건후생부)의 인공지능 조달에 필요한 도구의 개발과 시범 운영 사례가 있고, 나아가 공공주택 검색이나 세금 업무와 관련한 대국민 소통을 위한 챗봇, 우편 배달을 위한 자율 주행 서비스의 시범적 운영, 상표권의 침해 여부 분석 등에 사용되고 있다³⁾.

그러나 공공부문에서의 인공지능 활용은 주로 분류, 회귀분석 등 지도학습을 구조화된 데이터에 활용한 경우가 대다수이고, 이는 비정형 데이터까지 일반적으로 활용하여 결합 등을 탐지하고 있는 민간 부문의 활용 수준과 많은 차이가 있다. 미국 공공부문 인공지능 투자는 2022년 기준 110억 달러였으나, M&A, 기업 공개 등을 제외한 순 민간 부문 인공지능 투자는 2배 이상인 236억 달러로, 아직 정부, 공공분야 업무의 정량화와 자동화는 도입 시작, 혹은 초기 단계에 있다고 볼 수 있다.

향후 디지털심화시기에 현대 행정의 주요자원인 다양한 데이터를 통합, 분석하는 것이 행정 능력을 좌우하게 되고, 데이터와 인공지능 기반 등을 통해서 행정의 대응성을 높이고 이를 위한 제도적기반을 정비하는 것이 중요할 것으로 예상된다.

현재 우리나라도 민원, 재난·안전대응, 국방 등 공공서비스 부문에서도 인공지능 기술의 도입이 이루어지고 있고, 특히 물관리 여건의 불리함을 극복하고 이상기후로 인한 재해예방 등 효율적인 물관리를 위해 인공지능 홍수 예보, 댐·하천 디지털트윈(Digital Twin) 등 스마트 기술 기반의 물관리를 ‘국가물관리기본계획’, ‘국정과제’ 등을 통해 적극 추진중에 있으나, 수치모델의 한계와 한반도의 복잡한 지형 특성 등으로 신속하고 정확한 물관리 방안 마련에 어려움이 존재한다.

3) Government by Algorithm(Standford, 2023)

특히 최근 세계적으로 4차 산업혁명 기술의 급격한 발달로 ICT (Information Communication Technology, IoT, 인공지능, 디지털트윈 등을 물관리에 도입하여 이상기후로 인한 재해 예방, 물관리 효율화 증대 등을 위한 디지털 방식의 물관리 방안이 모색되고 있고, 세계 주요 물관리 강국(미국, 호주 등)들은 ICT 등 스마트 기술을 물관리 전반에 적용, 실시간으로 물 생산과 수요, 분배를 분석·예측하여 물관리를 효율적으로 관리하는 시스템인 스마트워터그리드(SWG)를 구축하고 있다.

또한 디지털 기술 발달로 글로벌 '디지털 워터 플랫폼' 선점을 위한 물관리 강국들의 경쟁이 본격화되고 있어, 스마트 기술을 활용한 물 관리는 4차 산업혁명 기술 발전에 힘입어 과거의 물관리 수준을 한단계 높일뿐만 아니라 새로운 물산업 영역을 구축하여 지속가능한 발전을 이룰 수 있도록 하는 원동력으로 작용할 것으로 예상된다.

이와 관련하여 최근 인공지능 등을 활용한 물관리 연구현황과 연구 방향 등에 대해 조사하고자 한다. 특히, 인공지능 기반 수량 예측 모델 조사와 수질 평가 모델 개발 등에 대한 연구를 수행하여 예측 성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 조건을 검토, 우리나라 실정에 적용할 수 있는 가능성을 모색하고자 한다.

그리고 최근 지구온난화 등 기후변화가 사회와 경제에 미치는 영향을 파악하기 위한 다양한 접근방법을 조사하고, 미국의 4차산업 첨단 융합기술을 통한 스마트워터그리드 추진 방안에 대하여 정리하고자 한다.

2. 한국의 물관리 현황

수자원 관리의 개념은 학문적 차원과 보고서에 따라 다소 다르기는 하지만 가장 통용되고 있는 GWP(Global Water Partnership)의 정의에 따르면 “생태계의 지속가능성을 저해하지 않고 공평한 방법으로 물, 토지 및 관련 자원의 개발과 관리를 유기적으로 실행해 나감으로써 경제 및 사회복지를 극대화하는 과정”이라고 정의하고 있다. 즉, 수자원 관리는 “지속가능성”이라는 원칙 하에서 물 연관 자원들의 전체론적 접근방법을 통한 관리를 의미한다. 같은 맥락 안에서 UNEP(UN Environment Programme)는 통합물관리를 지속가능성의 3개의 축(three pillars)을 활용하여 구성하면서 “Water For Livelihood(생명을 위한 물)”과 “Water as a Resource(자원으로 물)” 균형을 유지하는 것으로 개념화하고 있다.

한국의 「물관리기본법」에서는 ‘통합물관리’의 개념을 세 가지로 제시하고 있다. 물순환 과정의 모든 형상의 물(강수, 지표수, 지하수(토양수, 중력수, 모관수), 증발산(기체))을 모두 고려하여 통합 관리해야 하고, 물순환 전주기를 고려하여 정책을 추진해야 하는 것, 자연환경, 경제·사회에 미치는 영향, 수량 확보, 수질 보전, 재해 방지의 물관리 목적을 종합적으로 고려하는 것으로 제시되어있다.

2.1. 한국의 수자원 관리 현황

① 안정적 물이용 체계 구축

1965년 용수이용량 51억^m 대비 2018년 244억^m으로 4.8배 증가하는 등 댐·저수지, 상수도 등 시설 확충을 통해 안정적 물 공급 기반을 마련하였다. 국민 대다수가 물 걱정 없이 양질의 수돗물을 이용할 수 있는 체계를 구축하고, 광역상수도 확충 등을 통해 산업 발전에 기여하였다.

② 수질 오염 규제, 환경기초시설 설치

수질오염총량제 도입 등 수질관리를 위한 합리적 규제 노력을 지속해 왔다. 2015년에 '오염총량제' 시행으로 단순 농도 중심에서 총량 관리 체계로 전환했고, 조류(녹조), 난분해성 물질 관리를 위해 T-P, TOC 항목을 추가했다. 2006년에 가축분뇨법을 제정하여 2011년에 공공처리 시설 대상을 전체 축산농가로 확대했으며, 2007년에 산업단지 등 오염원이 집중된 지역에 비점오염관리 지정제도를 도입했다. 하수도 보급률을 1980년 8%에서 2018년 93.9%로 대폭 확대하는 등 하수처리장 등 환경기초시설 확충을 통한 하·폐수 오염부하를 저감하였다. 아울러, 2012년에 공공하수도의 효율적인 운영·관리를 위해 유역하수도관리체계를 도입하였다.

③ 하천복원 및 친수공간 관리

하천 환경생태 기능 강화를 위해 자연친화적 하천정비 방식을 도입하였다. 1996년에 자연친화적 하천관리지침 제정 및 하천정비기본계획 수립 규정을 개정하였고, 경안천·오산천·경천 등 7개 지구에 하천환경정비 시범사업을 실시 하였다. 아울러, '생태하천복원 중기 종합계획' 수립 등을 통해 생태하천 복원 노력을 지속하였다. 하천 고유의 기능을 유지하기 위한 하천유지유량 제도를 도입하고 확대해 왔다. 하천유지유량의 법적 근거 마련, 하천유지유량 고시, 주요 지류에 대한 고시 지정 확대 등을 추진하였다. 친수 목적의 하천 공간 활용도 제고를 위한 노력을 지속해왔다. 하천환경 등의 보전 또는 복원이나 하천공간의 활용 등을 위하여 보전지구, 복원지구 및 친수지구 지정 제도를 도입하고, 여가·건강·레저·교육 등의 기반확충을 위해 역사경관, 지역경관, 구조물경관, 순수생태거점 등 357개 친수지구를 조성하였다. 하천 시설 설치 허가시 공공성, 환경성, 이치수 영향 등을 보다 체계적으로 심사하기 위해 하천 점용허가 세부기준을 개정하였고, 하천 이용도 조사를 통해 활용도가 저조한 친수지구를 복원하고, 과학적 친수지구 이용도 모니터링을 본격 시행하였다.

④ 사전 예방적 홍수 방어체계 구축

홍수조절용량 확보, 하천 정비, 예보 능력 제고, 하수도 정비 등을 통해 홍수 예방 및 도시침수 방지 노력을 지속해왔다. 다목적 댐(20개), 홍수조절지(5개) 등으로 홍수조절용량 총 56억^m을 확보하였고, 국가하천(81.4%)·지방하천(48.1%)·소하천(45.5%)의 제방정비를 통해 하천유역 홍수피해 방지를 추진하였다. 홍수위험지도 제작, 홍수특보지점 확대, 홍수정보 제공 체계를 고도화하고, 예보정확도 향상 위한 강우레이더를 도입하여, 9개 레이더 구축을 완료하였다. 도심 상습침수구역에 대해 '하수도정비 중점관리지역'으로 지정하고, 지역별 특성을 반영하여 선제적 도시침수 대응사업을 추진하였다.

⑤ 예방 중심의 가뭄 대응 기반 마련

기 확보된 수자원시설을 효율적으로 활용하고, 가뭄 예·경보제 시행 등 대응 노력을 통해 가뭄 피해 지역을 감소시켜왔다. 2012년에 댐-보-저수지 상시 연계운영 제도 도입하여 2016년에 12개 수계로 확대하였고, 강수량 부족 시 댐 용수를 비축하는 '댐 용수공급 조정 기준'을 마련하였다. 물부족 사전 예방을 위해 '가뭄예경보제'를 도입하였다. 항구적 가뭄 극복을 위해 2017년부터 매년 관계부처 합동 가뭄종합대책을 수립하여 추진해오고 있다.

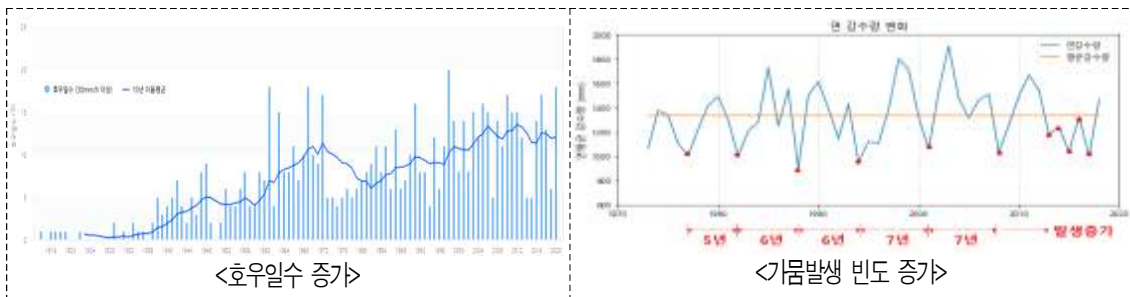
⑥ 물관리 일원화

2018년에 「정부조직법」, 「물관리기본법」, 「물관리기술 발전 및 물산업 진흥에 관한 법률」 등 물관리 일원화 3법을 제·개정하여, 수질(환경부)-수량(국토부) 일원화, 국가 및 유역의 통합물관리 거버넌스 체계 확립 등 유역 중심의 통합물관리 추진 기반을 마련하였다. 아울러, 2019년에 국가물관리위원회 및 유역물관리위원회가 출범하였다.

3. 한국의 AI 등을 활용한 물관리 현황

3.1. 물관리 관련 법령 및 계획

우리나라는 강수량이 홍수기에 편중되고 산악지형이 많아(63%) 이용 가능한 수자원의 계절별·지역별 차이가 커 물관리가 매우 어려운 여건이고, 2000년대 이후부터는 기후변화의 영향으로 홍수의 발생주기가 과거 4~6년에서 1~2년으로, 가뭄의 경우 과거 5~7년에서 2~3년으로 감소하는 등 홍수·가뭄의 강도 및 빈도가 증가하는 추세에 있다.



자료: 환경부

우리나라는 2018년 6월 「물관리기본법」 제정 등으로 물관리 일원화(환경부) 및 물관리 최상위 계획인 ‘국가물관리기본계획’ 수립 근거를 마련하였다. 물관리는 환경부 등 여러 기관에 업무가 분산되어 있고 다수의 관련 법률(「물관리기본법」 등 29개) 및 계획(‘국가물관리기본계획’ 등 97개)이 있다.

- 물관리 행정조직



- 분야별 법령 및 계획

(물관리)	「물관리기본법」	‘국가물관리기본계획’, ‘유역물관리종합계획’ 등
(물재해)	「수자원법», 「하천법」 등	‘수자원장기종합계획’, ‘하천기본계획’ 등
(물이용)	「수도법», 「물재이용법」 등	‘국가수도기본계획’, ‘물 재이용 기본계획’ 등
(물산업)	「물산업진흥법」 등	‘물관리기술 발전 및 물산업 진흥 기본계획’ 등

3.2. AI 등을 활용한 물관리 현황

정부는 물관리 여건의 불리함을 극복하고 이상기후로 인한 재해 예방 등 효율적인 물관리를 위해 인공지능(AI) 홍수 예보, 댐·하천 디지털트윈 등 스마트기술 기반의 물관리를 ‘국가물관리기본계획’, ‘국정과제’ 등에 반영하고, ICT, IoT, AI(인공지능) 등 4차 산업혁명 기술을 활용한 물관리 방안이 상·하수도, 수자원, 물환경 등 다양한 물관리 분야에서 활발히 추진되고 있다.



자료: 환경부

그리고 최첨단 기술을 활용한 물관리 방안이 ‘제1차 국가물관리기본계획(‘21~‘30년)’ 등에 반영되어 있을뿐 아니라 ‘국정과제’로 추진되는 등 정책적으로도 적극 추진되고 있다.

- '제1차 국가물관리기본계획' 상 ICT, AI 등을 기반한 물관리 주요 정책

분야	정책	주요 내용
물이용	· 기후변화 대비 효율적인 수자원 활용을 위해 댐 용수 공급계획 고도화	- 기상, 하천 등 댐 유역 상황을 맞춤형으로 자동분석하는 댐 용수공급분석 시스템 구축(가칭)
	· 하천수 관리제도 고도화를 위한 기반 구축	- 실시간 물수지 분석, 가용수량 전망 등을 지원하는 정보 시스템 개발
물재해	· 댐 하류지역의 홍수관리 제약 요건 해소	- 드론을 이용한 3차원 영상분석 및 계측자료 빅데이터화 등 댐 안전관리 스마트화
	· 저수지 및 배수장의 위기 대처 능력 제고	- ICT 기반의 스마트 배수장 관리
	· 홍수특보지점 확대 및 예보능력 강화	- AI기반의 홍수예보기술 개발 및 플랫폼 구축·운영

- 국정과제 관련 물관리 관련 주요 정책

정책	주요 내용
· 안전한 스마트 물관리	- 인공지능(AI) 홍수 예보('25년), 댐·하천 디지털트윈 구현('26년) 등 스마트기술 기반의 물 재해 예보 대응체계 구현
· 기후위기 감사·예측	- AI, 빅데이터 등 기반 기후변화 및 위험기상 예측 첨단기술 개발 등

그리고 환경부는 대규모 수도사고('19년 5월, 인천 적수사고) 방지 등을 위해 수도물 공급 전 과정에 대한 AI 및 ICT 기반의 실시간 감시·제어 체계를 구축하였고, 기존의 하수처리 공정을 빅데이터, AI 등 첨단 IT 기술을 접목해 신뢰도 있는 자료 생산·수집·분석하여 하수도를 운영 관리하고 있다.



자료: 환경부

또한, 환경부는 국가하천 및 댐 등 홍수발생 우려 기반시설에 대한 원격제어시스템 및 상시 모니터링체계와 오염지류 종합진단 및 개선, 지류·본류 통합 자동감시망을 구축하고 있다.



자료: 환경부

그러나 우리나라는 '18년 6월 물관리 일원화 등 행정체계의 일부 개편에도 불구하고 상·하수도는 환경부, 우수저류시설은 행안부, 하천은 지자체별로 관리 권한이 구분되어 있는 등 여전히 물관리 업무가 중앙부처 및 유역별 소속기관, 지자체 등으로 분산되어 있고, 물관리 체계가 과거 아날로그(Analog) 방식에서 디지털(Digital) 방식으로 급격히 전환 중에 있는 데도 관련 법령, 제도 등은 기존 체제를 답습하고 있는 한계가 있다.

또한 ① 물 정보가 기관별로 수집, 관측·관리되고 있어 물관리 정책결정시 정보 단절 발생 ② 개별법에 근거한 데이터 수집으로 이용자 관점에서의 낮은 활용성 ③ 물관리 대부분 정부 정책 주도로 추진되고 있어 다양한 이해관계자의 의견수렴 부족 등 제도적 한계가 있다.

4. AI를 활용한 물관리 활용 연구추세

그간 물관리 관련 예측모델 등은 전통적인 물리적 기반 모델에 의존해 왔지만, 빅데이터의 출현과 인공지능 모델의 개발은 보다 심층적인 예측모델을 개발할 수 있는 기반을 제공하였다. 특히 최근에는 물리적 기반 메커니즘과 인공지능 기술을 융합한 하이브리드 모델을 생성하는 것이 일반화되었고, 이러한 접근 방식을 어떻게 구현하는지에 대한 방식도 다양화되고 있다.

20여년 전부터 수자원 관리 선진국인 미국 등은 인공지능을 이용하여 물관리 방안에 대해 접근해 왔으나, 기후변화 등의 높은 불확실성과 복잡성, 비선형성 등으로 인해 수량 등의 예측이 어려운 문제를 극복하기 어려운 실정이다. 최근 수자원 관리 분야에서 인공지능 기술 사용에 있어 비약적인 발전이 이루어지고 있으나, 기후변화와 지구 온난화로 인한 심각한 자연재해의 증가는 지속 가능한 수자원 관리에 심각한 위협을 가하고 있다. 결과적으로 수자원의 변동성을 특성화하고 예측하기 위해 인공지능 모델을 탐색하는 모델 등이 최근 급증하고 있다고 볼 수 있다.

기상학적 불확실성이 증가함에 따라 인공지능 기술은 수학적 모델링에 대한 기존의 물리적 기반 또는 통계적 접근 방식에 대한 대안 또는 보완책을 제공한다고 볼 수 있다. 정형적 데이터 뿐 아니라 마이크로 감지, 영상, 현장 및 원격 감지 장치를 포함한 다양한 소스의 데이터를 활용함으로써 인공지능 기술은 보다 정교한 시공간 예측결과를 제공할 수 있고, 새로운 수학적 모델을 생성할 수 있게 되었다.

현재 개발되어 적용되고 있는 인공지능 활용 물관리 분야는 다음과 같이 구분⁴⁾할 수 있다.

4) Artificial Intelligence for Surface Water Quality Evaluation, Monitoring and Assessment(Rishi Rana 등 5인, 2023)

4.1. AI를 활용한물관리 활용 분야

- 스마트 수자원 관리

인공지능은 강수량, 유량, 수위 등을 예측하여 수자원 관리를 최적화할 수 있다. 예측된 데이터는 저수지 운영, 관개 시스템 관리, 도시 물 공급 관리 등에 활용되고 있고, 사물인터넷(IoT) 센서와 AI를 결합하여 실시간으로 수질, 수위, 유량 등을 모니터링하고, 이상 징후를 즉시 감지하여 대응하고 있다.

- 홍수 예측 및 관리

AI 기반의 홍수 예측 모델은 강수량, 하천 유량, 지형 데이터 등을 분석하여 홍수 발생 가능성을 예측할 수 있다. 이를 통해 사전 경고 시스템을 운영하여 피해를 최소화하고 홍수 발생 시 인명 구조 및 피해 최소화를 위한 최적 경로를 제시하고, 효과적인 자원 배분을 지원하고 있다.

- 수질 모니터링 및 관리

AI 모델은 실시간으로 수질 데이터를 분석하여 오염물질을 감지하고, 오염 발생 원인을 추적하여 수질을 개선할 수 있도록 하고 있고, 수질 변화를 예측하여 적절한 조치를 취할 수 있도록 지원한다. 예를 들어 특정 기간 동안의 오염 물질 농도를 예측하여 예방 조치를 강화할 수 있다.

- 물 재활용 및 폐수 처리

AI는 폐수 처리 공정의 효율성을 높이기 위해 최적의 운영 조건을 제시하여 에너지 소비를 줄이고 처리 비용을 절감하는 데 도움을 주고 있고, 물 재활용 시스템의 운영을 최적화하여 재활용 가능한 물의 양을 최대화하여 이를 효과적으로 활용할 수 있도록 지원하고 있다.

- 농업용수 관리 및 수자원 배분

AI는 기상 데이터와 토양 수분 데이터를 분석하여 작물의 물 필요량을 정확하게 예측하고, 필요한 수자원을 공급하여 정밀 관개 시스템을 구축

할 수 있도록 하고 있다. 또한, 지역 내 수자원을 효율적으로 배분하여 농업용수 부족 문제를 해결하고, 기후변화로 인한 가뭄 등에 효과적으로 대응할 수 있도록 하고 있다.

4.2. 물관리를 위한 AI 기술 동향⁵⁾

- 강수량 예측

최근 강수량 예측의 정확성을 기하기 위해 SVM(Support Vector Machine), Random Forest, XGBoost(eXtreme Gradient Boosting) 등 다양한 모델 등이 활용되고 있는데, 이 중 XGBoost가 강수량 측정에 가장 좋은 성능을 갖고 있는 것으로 평가되고 있다. XGBoost를 이용한 과거 강우량과 피해사례를 활용하여 미관측 구역의 예측 강우량을 계산하고 검증함으로써 홍수로 인한 강우량을 정확하게 예측하고 취약 지역에 대비할 수 있다.

그리고 서남아시아 월별 강수량에 대한 다중 모델 예측을 위한 인공 신경망(ANN)과 랜덤 포레스트 알고리즘을 기반으로 한 모델이 개발되었는데, 이 모델은 GEM EMO, NASA EOSS2S, CanCM4i 및 COLA SMAS CSM4 모델을 포함하여 북미 다중 모델 앙상블(NMME) 프로젝트의 4가지 예측 모델을 결합, ERA5 재분석 데이터 세트를 사용하는 것을 그 내용으로 한다.

- 기온 예측

강수량이 최고 및 최저 기온에 미치는 영향에 대한 확률론적 모델이 개발되었다. 해당 연구에서는 일일 강수량 발생 계량에 Markov 모델을 사용하고 있고, 온도에 미치는 각종 변수들을 표현하기 위해 MASCV (Multisite Multivariate Autoregressive Model)를 사용하였다. 이를 실증하기 위한 검증은 스페인의 Jucar강 유역에서 수행되었으며, 사용된 모델은 다변량 확률론적 모델을 사용하여 강우 발생에 따른 최대 및 최저 기온을 정확하게 예측한 것으로 평가받았다.

5) Artificial Intelligence for Surface Water Quality Evaluation, Monitoring and Assessment(Rishi Rana 등 5인, 2023)

- 유량 예측

기존의 시계열 모델의 문제를 해결하고 불확실성을 정량화하기 위해 BLSTM(장단기 기억) 신경망을 활용하는 확률론적 예측모델이 개발되었다.

위 예측모델은 미국에서 세 가지 사례에 대한 연구를 통해 검증되었으며 세 가지 예측 범위에서 BLSTM이 예측 신뢰성, 정확성 등이 다른 모델보다 우수한 것으로 나타났다. 더욱이, BLSTM은 특히 다른 모델에 비해 장기간의 유량 예측에 대해 더 정확하게 데이터를 처리할 수 있는 것으로 나타났다.

- 댐 유입 수량 예측

20년간의 정량적 데이터를 사용하여 댐에 유입되는 수량 예측을 위한 16가지 설계 시나리오를 사용, 가장 적합한 딥러닝 모델을 선택하는 프로세스와 방법론이 개발되었다. 해당 모델은 당시 대부분의 댐에서 사용하고 있는 저장 함수 모델(SFM)보다 유입량을 더 정확하게 예측하였다.

- 침수 깊이 추정

강수량 예측에 따라 수위 측정기(IoT) 센서의 특정 위치에서 침수 깊이를 추정하기 위한 확률론적 모델(SM_EID_IOT)이 개발되었다. 해당 모델은 IoT 센서의 침수 깊이 추정의 정확성과 신뢰성을 향상 시키기 위한 것으로, 대만 북부 Nankon 유역에서 테스트되었으며 SM_EID_IOT 모델은 데이터 세트에서 검증된 바와 같이 높은 정확도로 다양한 리드 타임에 침수 깊이를 추정할 수 있었다.

- 강수량 시계열 생성

Monte Carlo 시뮬레이션, 이변량 코풀러 및 수정된 허프 곡선 방법을 사용한 확률론적 강우 생성기가 개발되었다. 해당 강우 생성기는 대만 이란강 유역의 강우 시계열을 생성하는 데 적용되었으며, 통계 지수는 관측된 강우 시계열과 유사하게 나타났다.

- 지리공간 인공지능(GeoAI) 활용

방대한 양의 공간 및 비공간 데이터를 처리하는 데 효과적인 도구인 GeoAI가 수자원 관리에 적용되고 있다. GeoAI는 비선형 모델링, 계산 효율성, 여러 데이터 소스 통합, 높은 예측 정확도, 새로운 패턴 및 프로세스 파악 등의 이점이 있으나, 부적절한 모델 설정으로 인해 물리적 현상에 대한 설명과 및 모델 일반화가 부족하다는 단점이 있다. 이에 최근 GeoAI 연구는 물리적 기반 모델을 GeoAI 방법과 통합하고 자율 예측 및 예측 시스템을 개발하는 데 중점을 두고 있다.

5. AI를 활용한 수위예측 모델

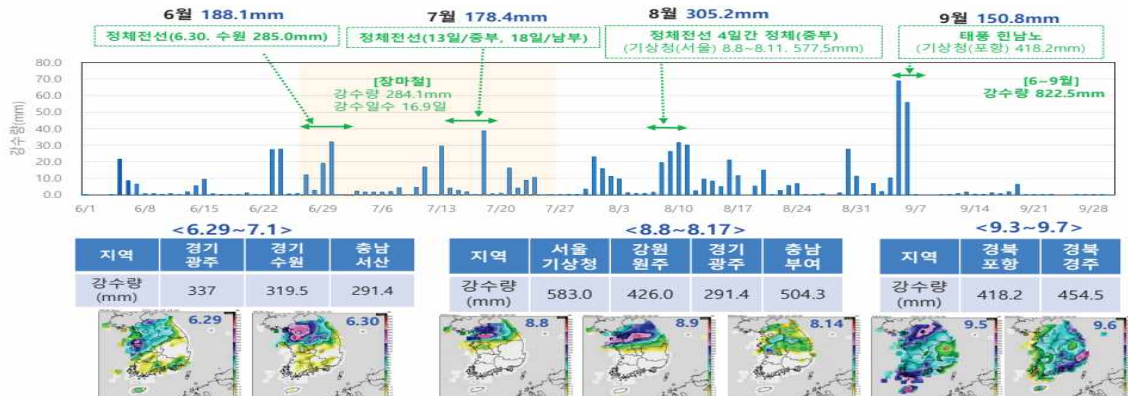
5.1. 국내의 하천 등 침수대비 현황

현재 우리나라 하천의 제방정비가 완료된 비율은 국가하천(73개, 3,602km)의 경우 79%, 지방하천(3,768개, 25,972km)의 경우 49%이고, 제방 보강이 필요한 구간은 국가하천 16%, 지방하천 28%⁶⁾로서 그간 환경부는 지속적인 하천 정비사업을 추진하여 「하천설계기준」상 목표로 하는 홍수방어 수준을 상당 부분 확보해 나가고 있다.

그럼에도 최근 10년간 수해(호우 및 태풍)로 인하여 연평균 9명의 인명피해와 2969억 원의 재산피해가 지속적으로 발생하고 있다.

이는 최근 특정 지역에 짧은 시간 동안 많은 강우가 내리는 국지성 집중호우가 발생하여 빗물이 빠른 시간에 하천으로 집중됨으로써 하천 제방이 붕괴되거나 하천수가 제방을 월류하기 때문이다.

기후변화에 따른 우리나라의 100년간 10년 평균 강수량 변동 추이를 살펴보면 연평균 강수량은 증가하지만, 강수일수는 감소하여 강우강도는 증가하는 추세이고, 연평균 강수량을 초과하는 집중호우와 태풍 등이 6~9월 사이 집중적으로 발생하는 등 강우의 불규칙성은 크게 증가하였다.



자료: 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청)

6) 한국하천일람(환경부, 2021)

7) 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2023)

이처럼 최근의 하천 범람은 집중호우 또는 태풍에 의해 하천의 수량이 급격히 증가하고 이로 인해 하천의 수위가 상승하여 제방을 넘거나 높아진 수압으로 제방이 붕괴되어 많은 양의 물이 한꺼번에 제내지로 유입됨으로써 하천 주변의 주거·상공업 지역 등 도심지 주요지역을 침수시켜 큰 피해를 일으키고 있다.

이에 환경부⁸⁾는 2017년 1월부터 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 따라 수자원장기종합계획의 일환으로 이수·치수·하천환경을 통합 고려해 수자원관리의 기본자료를 도출하는 하천유역수자원관리 계획과 실제 하천의 제방 및 이수·치수 등 하천 유지관리 시설을 설치하는 하위계획인 하천기본계획을 수립하고 있으며, 하천기본계획을 수립할 때에는 「하천설계기준」을 반영하고 있다.

이와 관련하여 일부 선진국의 경우 기후변화에 따른 홍수량 증가를 대비하고자 재해지도를 활용하는 등 위험도 평가를 통해 지역을 구분하고 특히 인구·자산밀집지역 등 중요구간에 대해 홍수방어 수준(설계빈도)을 상향 적용하는 등 치수정책에 있어 위험지역별로 홍수방어 수준을 달리하고 있다⁹⁾.

예를 들어, 독일은 「연방 수자원 관리법」에 따라 설계빈도 100년을 기준으로 홍수피해저감 목표를 설정한 뒤 구조적·비구조적 홍수관리 대책을 종합하여 위험도 관리계획을 수립하고, 피해규모에 따라 특수 지역, 주거지역, 산업단지는 위험도 평가에 따라 500년 빈도 까지 적용하고 있다.

그리고 프랑스는 기존지침서 및 주요 재해별 계획수립 가이드라인 구축하여 과거 재해이력 지도, 위험지도, 취약성 지도, 영향권 지도 등 다양한 종류의 재해지도를 마련하고, Red Zone, Blue Zone, White Zone 등 영향권별 대책수단을 수립하며, 최근 비구조적 대책수단에 우선권을 부여하고 있다.

또한, 스위스는 주요 재해별 계획수립 가이드라인을 구축하고, 계획

8) 기후위기대응 홍수방어기준 수립연구 최종보고서(환경부, 2018)

9) 도시침수 관련 통계분석 및 위험요인 분석 연구(감사원, 2021)

초기단계에서 재해에 대한 종합적 평가를 실시하며, 재해지표지도(hazard index map)와, 강도별 지도(intensity map)를 작성하고 있다.

이에 따라 우리나라도 2018년 하천기본계획 수립 시 하천시설물의 설계에 기준이 되는 「하천설계기준」을 개정하면서 하천의 홍수방어 수준(설계빈도)을 결정할 때 기존의 하천 등급(국가하천과 지방하천)에 따른 분류와 더불어 하천 주변지역 중요도에 따른 4가지 분류기준을 추가해 개정함으로써 선택적 홍수방어로 정책을 전환하였다.

이후 추진된 위 수자원관리계획의 치수관리계획분야에서도 하천 주변의 사회·경제적 가치를 고려하여 주요 구역별 홍수방어 목표를 설정하고, 구조적·비구조적 홍수방어 대책을 제시하기 위해 하천유역 주요 지점별 홍수량을 산정하며, 하천별로 홍수량을 배분하는 등 하천유역 주요 구역별 치수안전도를 달리 설정함으로써 하나의 하천 내에서도 구역별로 다른 홍수방어 수준(설계빈도)을 적용하도록 방침을 정하는 등 선택적 홍수방어 개념을 도입하였다.

그리고 행정안전부와 환경부 등 재난대응·치수분야 관계부처는 2023. 12. 7. 이상기후에 대한 선제적 대책방안으로 재난 위험지역을 확대 발굴하고, 디지털 기술의 활용·관계기관 간 협력강화 등 재난대응 역량을 제고하며, 홍수피해 우려가 큰 지방하천을 국가하천으로 승격하고 하천 합류부·제방 정비사업 등 치수종합대책을 발표하였다.

위 치수종합대책에는 전문기관을 통해 홍수기 전·중·후에 하천시설을 일제 점검하며 홍수취약지구 지정 누락을 방지하고, 긴급 정비가 필요한 구간을 조속히 보수하는 등 하천의 홍수취약지구 관리 강화 방안도 포함되어 있다.

그리고 「하천설계기준」에 따르면 도로교, 철도교 등 하천에 설치되는 모든 교량은 계획홍수위에 여유고를 더한 높이 이상으로 설치하여야 하는데, 교량이 너무 낮게 설치될 경우 유송잡물이 교량 난간 등에 걸려 유수의 흐름을 방해할 수 있으며 이로 인해 하천의 수위가 상승하여 인근 제방을 월류함에 따라 주변 지역이 침수되는 사고가 발생하기도 한다.

이에 환경부는 계획홍수위보다 제방이 낮아 월류위험이 있거나 배수위 영향을 받는 지류하천 중 국가하천 제방보다 낮은 구간 등을 홍수취약지구로 관리하고 있다.

그리고 행정안전부는 매년 “여름철 호우·태풍 사전대비 추진지침”을 마련하여 지자체로 하여금 통제기준을 마련하여 관리하도록 하고 있고, 침수사고로 인명피해가 우려되는 지하차도를 “인명피해 우려 지하차도”로 지정(풍수해관리시스템에 등록)하도록 하는 한편, 지하차도 진입통제가 효율적으로 이루어질 수 있도록 2019년부터 2021년까지 지자체가 관리하는 총 55개 침수위험 지하차도에 대해 “자동차단 시스템”을 구축하도록 재난안전특별교부세를 집행하여 지원하고 있다.

그리고 국토교통부는 터널 내 침수 등의 긴급상황 발생 시 차량이 터널로 진입하지 못하도록 터널 입구부 전방에 진입차단시설을 설치하는 내용을 포함한 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침」을 운영하고 있다.

5.2. AI를 활용한 수위예측 모델¹⁰⁾

최근 행정안전부(통합데이터분석센터)는 2023년 8월부터 저수지 수위에 영향을 미치는 다양한 실시간 정보를 활용해 전국 저수지의 수위변화를 예측하기 위해 인공지능을 기반으로 한 ‘저수지 수위예측 모델’을 개발하고 있는 등 매년 발생빈도가 높아지고 있는 국지성 집중호우에 대한 피해 예방과 관련 정책 수립에 활용하기 위해 AI를 활용한 수위예측 모델의 필요성이 커지고 있다.

과거 수위 예측 모델은 주로 수치 모형을 통해 사용되었는데, DAMBRK (DAM BReak Food Forecasting Model), DEM(Digital Elevation Model) 등을 이용하여 하천 범람의 위험도와 시간대 별 침수구역 및 침수심을 산정하였다. 그러나 기존의 수치모형은 예보 등을 위한 시간 확보 등에 제한이 있고 실증되지 않은 공간적 불확실성으로 인해 예측이 정확하지 않을 수 있는 문제점이 있다.

10) Prediction of Water Level in Lakes by RNN-Based Deep Learning Algorithms to Preserve Sustainability in Changing Climate and Relationship to Microcystin(Serkan Ozdemir, Sevgi Ozkan Yildirim, 2023)

따라서 최근에는 많은 양의 데이터를 처리할 수 있는 기술이 발전하여 데이터를 중심으로 한 모형을 이용해 수위를 예측하고 있다.

주로 RNN(Recurrent Neural Network), ANN(Artificial Neural Network), LSTM 등의 인공지능 기법을 사용하고 있으며 RNN은 각종 시계열 정보처리에 강점이 있으나 가중치 소실 등의 문제를 가지고 있어 이전의 모든 학습 내용을 기억하여 다음에 적용할 때 데이터가 누적되는 경우 예상치 못한 오류가 발생할 가능성이 있다. ANN 기법도 실시간으로 수위를 예측에 사용되었으나 높은 정확도를 보여주지 못하였다.

이에 반해 LSTM은 RNN의 단점인 장기적 의존성 및 가중치 소실 등의 문제를 해결한 것으로 평가받고 있다. Chen Liang은 2003년부터 2012년까지의 일일데이터를 활용하여 중국 중팅 호수 수위 변동을 연구하고 SVM(Support Vector Machine) 모형보다 LSTM 기법을 이용한 예측 모형이 더 정확도가 높다는 것을 알아냈다.

따라서 수치모형이나 RNN 기법 등을 이용한 모형을 사용하기보다는 LSTM 기법을 사용한 예측 모형이 정확도와 신속도의 측면에서 더 낫다고 판단된다. 또한 기존에 사용하였던 정형 자료만을 입력인자로 선정하는 것이 아니라 비정형자료도 입력인자로 구축할 필요가 있다.

5.2.1. 수위예측 알고리즘 개요¹¹⁾

- 기계학습(Machine Learning)

딥러닝(Deep Learning)은 신경망 알고리즘을 주로 사용하는 머신러닝 분야 중 하나이며, 인공신경망이 발전한 개념이다. 인공신경망은 인간의 뇌구조의 신경세포인 뉴런이 연결된 형태를 본떠서 고안된 것으로 입력망(Input layer), 은닉망(Hidden layer), 출력망(Output layer)으로 이루어져 있다. 각각의 데이터들은 학습효과를 따라서 가중치가 변동되고, 활성화함수(Activation function)에 의해 출력이 산출된다. 이러한 활성화 함수는 사용 목적에 따라 함수의 선택도 달라진다.

11) 하천 수위예측 알고리즘 개발-비정형 자료의 활용성 제고(이승민, 2020)

- 텐서플로우(Terwrflow)

텐서플로우(Tensorflow)는 구글이 개발·배포한 오픈소스 라이브러리로서 데이터의 흐름도(Flow chart)를 이용해 수치 계산을 수행할 수 있다. 텐서플로우는 노드(Node)와 엣지(Edge)로 구성되어 있는데, 노드는 수학적 계산, 데이터 입출력, 읽기 및 저장 등을 수행하고, 엣지는 노드 사이 데이터 입출력 관계를 의미하고, 동적 크기의 다차원 데이터 배열의 경로가 된다. 또한 GPU(Graphics Processing Unit)와 CPU(Central Processing Unit)로 빅데이터 작업을 실행할 수 있으며, 여러 프로그램 언어로도 적용이 가능하다.

- LSTM 기법(Long Short-Term Memory)

LSTM 기법은 여러 게이트(Gate)의 셀(Cell)로 구성되고 게이트는 입력, 망각, 출력의 3가지 종류로 구성된다. LSTM 기법은 입력데이터와 그 전 과정에서 출력데이터를 동시에 이용하여 학습이 가능한 RNN (Recurrent neural network) 의 가중치 소실 문제(Vanishing gradient)를 방지할 수 있어서 시계열 데이터 처리에 유리하다.

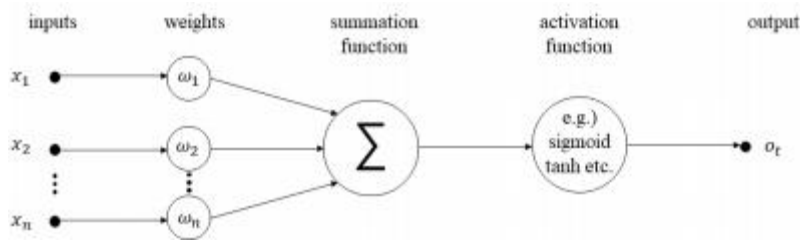
5.2.2. 수위예측 알고리즘 구축 사례¹²⁾

5.2.2.1. NARX model 활용

최근 하천 등의 수위예측을 위해 인공신경망으로서 외생변수를 활용하고 있는 비선형 자기회귀 신경망 모형(Nonlinear Auto-Regressive eXogenous model, NARX)을 사용하는 것이 일반적이다.

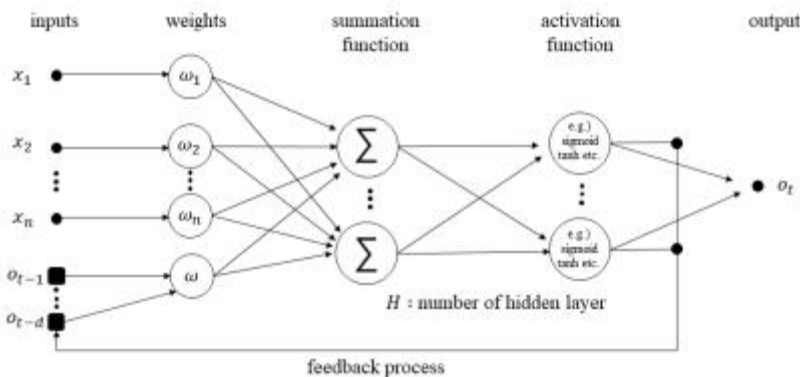
기존 인공신경망 모형은 입력망(Input Layer)에 데이터를 입력하면 입력 수치와 가중치를 곱한 값을 모두 합산한 후 활성화 함수를 통해 최종적으로 결과가 산출되는 전방 전달 신경망의 구조로 구성되어 있었다.

12) Comparison of ANN Approach with 2D and 3D Hydrodynamic Models for Simulating Estuary Water Stage(Chen, W. B., 2012)



자료: Structure of ANN model

반면에, NARX 모델은 기존의 인공신경망 구조와 다르게 학습 시도출되는 출력 값이 다시 입력망 입력 값으로 돌아가 학습에 사용되는 피드백 구조를 띠는 특징이 있어 자기상관성을 갖는 시계열형태 자료를 예측하는 것에 적합하며, 이는 $o_t = \mathcal{J}(o_{t-1}, o_{t-2}, \dots, o_{t-d}, x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, \dots) + \epsilon_t$ (1)로 나타낼 수 있다¹³⁾. 여기서, o_t 는 점 t 에서의 시스템 출력값이고 x_t 는 시점 t 에서의 시스템 입력값이며 ϵ_t 는 오차의 항이다. d 는 피드백하는 과거의 출력값의 개수이고, 이는 시계열 자기상관성 형태에 따른 민감도 분석을 통한 최적의 값을 선택하도록 되어 있다¹⁴⁾.



자료: Structure of NARX model

5.2.2.1. 정확도 분석

Serkan Ozdemir가 2022년 수행한 연구¹⁵⁾에서는 ANN과 RNN, NARX 모델을 통한 학습 후 예측 출력 결과 데이터에 대한 통계분석을 하여 각 모형의 정확도를 비교하고 있다.

13) Comparison of ANN Approach with 2D and 3D Hydrodynamic Models for Simulating Estuary Water Stage(Chen, W. B., 2012)

14) A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation(Tran and Song, 2017)

15) Prediction of Water Level in Lakes by RNN-Based Deep Learning Algorithms to Preserve Sustainability in Changing Climate and Relationship to Microcystin(Serkan Ozdemir, 2022)

모델의 정확도에 대한 판단 지표는 RMSE(Root Mean Square Error)와 MAE(Mean Absolute Error)를 사용하였으며, RMSE 및 MAE는 실제 관찰 값과 예측 수치의 오차를 정량화하여 나타내는 지표로 수치가 0에 가까울수록 실제 값과 유사하게 실현되는 것을 의미한다.

위 연구에서는 정량적인 오차분석 외에도 결정계수에 대한 분석을 하였다. 결정계수를 상관계수의 제곱으로 나타내고 0~1사이의 값을 갖는다. 결정계수의 값이 1에 가깝다면 관측값과 모델의 예측 결과값이 서로 선형관계를 갖는다고 판단할 수 있고, 이를 통해 예측값과 실제값 간의 경향성을 확인할 수 있다.

5.2.2.2. 모형 적용

① 입력 자료간의 상관성 분석

사회기반시설 등의 침수에 큰 영향을 끼치는 하천수위는 조위와 강수량 및 하천 유량 등 여러 인자들에게서 영향을 받을 수 있고, 다양한 영향인자 중 하천수위와 직접 관련이 있는 인자도 인공신경망 모델 학습 시에 각종 노이즈를 발생시킬 수도 있다.

이에 노이즈를 발생 가능성이 있는 하천 유량 자료를 제외하고 조위와 강수량 자료에 대하여만 상관성 분석을 수행할 필요가 있다.

② 입력자료 구축

NARX를 이용하여 수위를 예측할 때 학습에 사용한 자료는 일정기간의 수위자료와 강수량자료로, 각각의 자료에는 결측치(Missing value)가 존재하는데, 수위자료의 결측치는 주로 동절기에 있고, 동절기는 수위 변동이 조위변화 밖에는 없어 선형보간이 수행되어야 한다. 강수량 데이터 결측치가 비강우시기에 존재하여 이를 0으로 간주하였다.

③ Machine Learning Tool 및 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

NARX model을 이용하여 수위예측을 수행하기 위하여 Matlab에서 제공하는 Deep Learning Toolbox가 활용되고 있다. 딥 러닝 툴박스는 GUI(Graphic User Interface)에 제공해 입력자료 및 예측변량을 먼저

설정된 후 모형 변수로 은닉망(Hidden Layer)의 개수와 시간지연 값을 설정한 후 학습과 예측을 수행할 필요가 있다.

5.3. 동적 인공신경망을 활용한 수위예측

수자원 관리와 활용 및 홍수 제어 등 목적으로 최근 인공신경망과 유전자 알고리즘 및 뉴로-퍼지 모델을 사용한 연구가 다양하게 이루어지고 있다¹⁶⁾.

이러한 동적 인공신경망은 IDNN(Input Delay Neural Network), TDNN(Time Delay Neural Network), NARX 등이 있으며, 인공신경망을 사용한 수위예측의 경우 Chang(2010)은 오류역전 알고리즘을 사용하여 분류기법에 기반한 침수예측 모델을 구축하였고, Pan(2011)은 하이브리드 인공신경망을 사용하여 강우에 따른 침수예측 모델을 개발하였다.

Chang이 실시간으로 수위를 예측하기 위해 오류역전과 알고리즘과 Elman 인공신경망 및 외생변수를 사용한 NARX를 비교한 결과, NARX 신경망 이용 결과가 가장 정확하였다. Chang은 순환형 신경망을 자기조직화 신경망을 사전에 구축한 2차원 침수지도와 침수량 합계를 연계하여 실시간 홍수 예보 시스템도 구축하였다.

5.3.1. 수위예측 분석을 위한 인공신경망¹⁷⁾

- IDNN(Input Delay Neural Network)

인공신경망은 통상 정적훈련이나 적응훈련을 통해 학습을 하게 되고, 다양한 수치의 강우량이 나타나는 시계열 형태 입력자료는 이에 대한 적응훈련이 필요하다. 적응훈련은 순환훈련으로 표현되기도 하고, 새로운 데이터의 관측값이 추가될 때 예측 모델 재보정 및 훈련을 통해 업데이트가 가능하다. 이런 동적 적응형 학습 과정이 실시간으로 강우와 유출 특성을 반영한 후 홍수 예측 모델 등의 매개변수가 조정될 수 있도록 한다.

16) 도시침수 해석을 위한 동적 인공신경망의 적용 및 비교(김현일, 2020)

17) A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation(Tran and Song, 2017)

- 시간 지연 인공신경망(Time Delay Neural Network, TDNN)

입력 지연 인공신경망은 다층인식자 입력망에 입력 데이터의 지연선만이 추가된 단순한 형태로 구성되어 있다. 그러나 시간 지연 인공신경망은 입력층 뿐만이 아니라, 은닉층에 지연선이 추가돼 강우와 유출 데이터에 대한 보다 정밀한 순환훈련 등이 가능하다.

- 외생변수를 이용한 비선형 자기회귀 신경망

비선형 자기회귀 신경망은 다수의 신경망 층을 둘러싼 피드백 연결 구조를 가지고 있다. 시계열 형태인 외생변수를 사용한 선형 자기회귀 모형에 기반을 두고, 다른 두 인공신경망과는 달리 학습 시에는 도출되는 유출량이 재차 입력층으로 회귀하여 학습에 이용되는 특징이 있고, 시계열 입력자료에 대한 높은 학습력을 가진다. 외생변수를 사용한 비선형 자기회귀 신경망이 홍수예보에 필요한 정기적 관찰 데이터가 부족한 경 유용하고, 충분한 선행시간이 필요하며 간단한 조합인 수문학적 입력 데이터를 요구하는 실시간 예측에 적합하다고 할 수 있다.

5.3.2. 인공신경망을 활용한 수위예측 분석추세

- LSTM을 이용한 수위예측

Long Short-Term Memory 네트워크는 시계열 데이터의 장기 의존성을 학습하는 데 강점을 가지고 있어 수위 예측에 많이 사용되고 있다. LSTM을 이용하여 강수량과 지역적 특성을 기반으로 수위의 변동을 예측하는 모델을 개발되고 있으며, 이 모델은 강수량의 변화가 수위에 미치는 영향을 정확히 반영하여 실시간으로 수위를 예측하는 데 사용되고 있다.

- 다층 퍼셉트론을 이용한 수위예측 시스템

기상 데이터, 지형 데이터, 물리적 특성 등을 입력 변수로 사용하여 다층 퍼셉트론(Multilayer Perceptron, MLP)과 같은 인공신경망 모델을 활용한 모델은 복잡한 비선형 관계를 학습하고 시계열 패턴을 예측하는 데 적합하다. 특히 급변하는 기후 조건에 의해 영향을 받는 지역에서 해당 수위예측 시스템은 물의 효율적 관리와 홍수 예방에 중요한

역할을 할 수 있고, 도시의 댐 운영에 있어 인공지능 기반의 예측 시스템은 잠재적인 홍수 위험을 사전에 감지하고 조치를 취할 수 있는 시간적 여유를 제공할 수 있다.

3. CNN-LSTM 하이브리드 모델

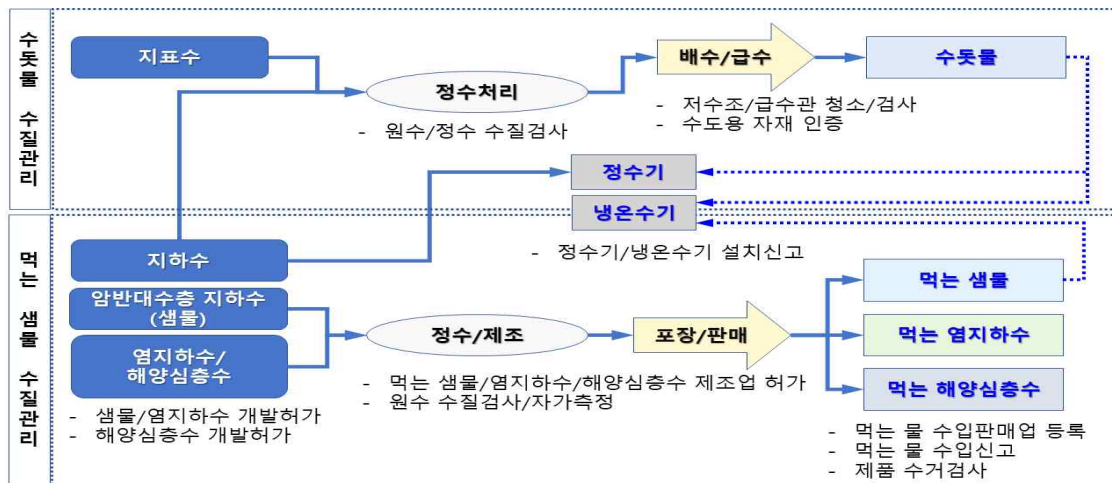
합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)과 LSTM을 결합한 모델은 공간적 특성과 시간적 패턴을 모두 고려하여 예측성능을 개선하는 데 사용되고 있다. CNN은 공간적인 관계를 학습하고, LSTM은 시계열 데이터의 장기 의존성을 학습하여 효과적인 수위 예측을 가능하게 하고 있다.

다수의 수문이 있는 수로에서는 CNN-LSTM 하이브리드 모델을 사용하여 각 수문의 개방 및 폐쇄 시점을 최적화하고 수위를 조절함으로써 수자원 관리의 효율성을 극대화할 수 있다.

6. AI를 활용한 수질 관리·평가 모델

6.1. 국내의 수질관리 현황 등¹⁸⁾

수돗물은 하천수나 강변여과수, 지하수 등을 취수하여 응집침전, 여과, 소독(또는 활성탄 흡착과 소독) 등의 처리를 거친 정수를 각 수용가로 배수·급수하는 과정을 통해 공급되는데, 이에 대한 수질관리는 원수나 정수에 대한 정기적인 수질검사와 수질기준 위반 시 급수의 긴급정지·긴급 급수지원, 저수조나 급수관에 대한 청소와 검사, 배관이나 설비에는 수도용으로 인증을 받은 수도용 자재나 제품을 사용하도록 하는 체계로 이루어지고 있다.



자료: 먹는 물 수질관리 실태(감사원, 2024)

먹는 물의 수질기준은 1963. 3. 13. 「수도법」에 근거하여 제정된 구 「수도법에 의한 수질기준·수질검사방법·건강진단 및 위생상의 조치에 관한 규정」에 총 28개 항목을 처음으로 정하였다. 그리고 1995. 1. 5. 「먹는 물 관리법」이 제정되면서 먹는 물 수질기준도 그 하위규정인 먹는 물 검사규칙(환경부령)으로 전면 개정되었고, 그 후 카드뮴, 우라늄, 브롬산염, 시안, 수은, 휘발성유기화합물 등의 항목 추가와 기준을 강화하였으며 현재는 먹는 물 검사규칙(환경부령)에 총 66개 항목에 대한 기준을 정하여 먹는 물의 수질을 관리하도록 하고 있다. 특히 2019. 1. 1.

18) 먹는 물 수질관리 실태(감사원, 2024)

부터 수돗물에서 매 분기 1회 이상 우라늄(기준: $30\mu\text{g}/\ell$)을 검사하도록 의무화하여 먹는 물에 대한 수질 관리가 강화되었다.

한편 환경부가 발표한 “2021 수돗물 먹는 실태조사 결과보고서”(2021. 10. 25.)에 따르면 국민 중 51.0%가 가구 내에서 정수기를 사용하고 있었고, 수돗물에서 이물질이나 냄새 등으로 불편함을 느낄 때 36.6%가 정수기 사용이나 수도꼭지 필터 설치로 대처하고 있었다. 냉온수기나 정수기의 수질을 확보하여 국민건강에 안전을 보장하기 위하여 냉온수기나 정수기 설치·관리자는 냉온수기나 정수기의 필터를 정기적으로 교체하고 청소를 하여야 하며, 관리카드를 비치하여야 하고, 특히 정수기는 총대장균군과 탁도 항목에 대한 수질검사를 실시하여 수질기준에 적합하도록 관리하여야 한다.

수돗물의 생산과 공급 체계는 상수원에서 취수시설을 통하여 원수를 취수한 뒤 이를 처리한 정수를 배수, 급수 과정을 거쳐 수용가에 공급하고 있는데, 수돗물의 수질을 관리하기 위하여 「수도법」, 같은 법 시행령과 시행규칙, 예규, 고시, 매뉴얼, 시설기준 등으로 수돗물의 공급 단계별 수질관리 체계를 두고 있다.

수돗물의 원수로 사용되는 상수원의 오염을 막기 위하여 「수도법」 제7조에 따라 환경부가 상수원의 확보와 수질 보전을 위하여 필요하다고 인정되는 지역을 상수원보호구역으로 지정하도록 하고 있고, 상수원보호구역에서는 수질오염물질이나 유해화학물질, 농약, 폐기물, 오수·분뇨, 가축분뇨를 사용하거나 버리는 등의 행위를 금지하고 있으며, 상수원보호구역에서 건축물이나 공작물의 신축·증축·개축·재축·이전·용도변경 또는 제거, 임목과 대나무의 재배 또는 벌채, 토지의 굴착·성토, 또는 토지의 형질변경 행위를 하려는 자는 관할 지방자치단체의 허가를 받도록 하고 있고, 상수원보호구역 상류나 취수시설의 상·하류 일정 지역에는 공장설립을 금지하고 있다.

그리고 「수도법」 제18조, 같은 법 시행령 제29조에 따라 일반수도사업자가 수도시설을 설치할 때 정수시설의 수질 확보를 위하여 원수의 질과 양, 지리적 조건, 수도의 종류와 시설의 규모에 따라 원수를 먹는 물 수질기준에 맞게 필요한 만큼 처리할 수 있는 정수시설을 갖추도록

하고, 「상수도시설기준」(환경부, 2010년)에 수돗물의 수질을 확보하기 위하여 정수시설과 배수, 송수, 저수시설의 설치 기준과 그 운영 방법을 규정하고 있다.

「수도법」 제29조와 먹는 물 검사규칙 제4조 제1항 제1호에 따르면 일반수도사업자는 [표 11]과 같이 수도꼭지와 급수 과정별 시설에서 주기적으로 수질을 검사하여 그 결과를 관할 시·도를 통하여 환경부에 보고하여야 한다.

그리고 「수도법」 제33조와 제34조에 따르면 수돗물을 다량으로 사용하는 건축물 또는 시설로서 일정한 규모 이상의 건축물 또는 시설의 소유자나 관리자는 반기에 1회 이상 저수조를 청소하여야 하고, 월 1회 이상 저수조의 위생상태를 점검하여야 하며, 저수조 청소 후 물을 채우고 잔류염소, 수소이온 농도, 탁도에 대한 수질검사를 하여야 하고, 급수관을 주기적으로 검사하여 그 결과에 따라 세척·갱생·교체 등 필요한 조치를 하여야 하며, 일반수도사업자는 이를 지도·점검하여야 한다.

수돗물의 생산과 공급과정에서 수질을 관리하기 위하여 시설기준과 시설의 운영기준, 주기적인 수질검사, 위생조치 등 관리기준을 두고 있는 것과 함께 원천적으로 오염물질이 용출되지 않는 자재나 제품을 수도용으로 사용하도록 함으로써 수질 안전성을 확보하기 위하여 취수나 저수 시설을 제외한 수도시설 중 물에 접촉하는 수도용 자재나 제품을 제조 또는 수입하려는 자는 「수도법」 제14조에 따라 미리 환경부로부터 위생안전기준에 맞는지에 대하여 인증을 받도록 하고 있고, 인증받은 제품만을 수도시설에 사용하도록 하고 있다.

6.2. AI 등을 활용한 수질관리 체계 연구

수자원 공급을 하는 수도시설 등의 공급은 단위공급과 전체공급으로 구분되는데, 수도시설의 모든 단계에서 수질관리, 각종 약품의 투입, 수자원처리장비 운용 등을 위한 평가와 환류를 위한 통제기술이 요구된다. 수자원의 수질기준 강화와 통제기술의 과학화, 기술력 제고 및 각 기능별 전문화 등이 요청되어 수질관리에 인공지능 기법이 도입되고 있다.

6.2.1. AI 기법을 활용한 수질관리 체계 연구사례

Zhang. Q와 Stanley. S는 수자원 처리공정의 침전과 응집의 효율성 등을 제고하기 위해 인공신경망 기반 모형을 개발¹⁹⁾하였다. 먼저 2천 개 이상의 수도시설 제어 데이터를 활용하여 신경망 공정 모형을 구축하였고, 이 모형을 이용하여 다른 입력데이터와 영향변수를 입력, 수자원 처리공정에 대한 인공신경망 모형을 구축할 경우에도 사용이 가능하다.

Petter Straub은 의 수자원의 염소 농도를 유지하기 위한 염소 투입량 예측모형을 개발²⁰⁾하였다. 이 모델은 다중회귀 모형과 인공신경망 모형을 이용하여 개발되었고, 염소의 분해에 영향을 미치는 데이터들을 활용한다. 염소 투입량 예측모형을 통해 수자원 잔류염소의 농도 투입량을 비교적 정확하게 결정할 수 있으며, 보다 효율적으로 전염소의 투입량을 예측하는 등 유용한 모델로 활용할 수 있다

Lowe. M은 수자원 관리 분야에서 머신 러닝(machine learning)을 활용한 수질 평가체계가 기존 평가의 신뢰성을 제고하고 비용 역시 절감할 수 있을 것으로 주장²¹⁾하였다. 그는 인공지능 기반 평가체계가 수자원 제어와 품질 최적화 등과 같은 과제들을 해결할 수 있다고 주장하였다. 그리고 인공지능형 모형을 성공적으로 구현하기 위해서는 방대한 데이터의 체계적 관리, 모형의 재현성 구현 등이 필요함을 지적하였다.

한편 정수처리과정에서 응집제 등 각종 약품들의 투입량을 결정하는 것이 중요한 요소이고, 최근 이를 위한 인공지능을 활용하여 수질 관리와 잔류 염소제어 등을 위한 모형의 개발에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

19) Real time water treatment process control with artificial neyral networks(Zhang Q., Stanley S, 1999)

20) Specifying formative constructs in information systems research(Petter Straub, 2008)

21) A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring(Lowe. M, 2018)

6.2.2. AI 기법을 활용한 수질관리 체계 분석방법

인공지능 알고리즘 등을 활용하여 정수처리과정에서 염소 수치 등을 예측하고, 각종 약품의 투입량을 자동으로 제어하는 모델을 이용하여 수자원 처리과정의 개선과 과거 인력으로 관리하여 발생한 문제점을 개선하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

인공지능을 기반으로 하는 예측모델은 수질데이터의 입력과 출력이 비교적 수월하며 기존의 물리적, 화학적, 생물학적 공정을 제외하고 수집한 데이터를 사용하여 수질을 예측할 수 있다.

수질관리 기술에 인공지능이 적용될 경우 수자원 처리 과정에서 발생할 수 있는 비용을 절감하고, 약품 사용 등을 최적화하는 것 등에 큰 효과가 있을 것으로 기대할 수 있다.

인공지능을 기반으로 하는 빅데이터 처리기술은 정수처리과정에 있어서 매우 유용하다. 이와 같은 수자원 처리과정은 수질과 유량이 자동으로 계측될 수 있도록 개발된 시스템으로, 비교적 확실한 경계 조건을 가진다. 해당 데이터들을 분석하여 수자원처리공정의 관리와 예측, 제어, 최적화 등을 수행할 수 있다.

6.2.2.1. 인공지능 알고리즘의 정수처리 공정 적용 모델

인공지능 알고리즘을 정수처리 공정에 적용하기 위해 활용하는 인공지능 기반 모델로 다중회귀모형과 랜덤포레스트, 서포트 벡터 머신, XGBoost, 인공신경망, 장단기 기억 등이 활용되고 있다²²⁾.

- 다중회귀모형

Multiple Regression Model은 통계학과 머신러닝에서 중요한 개념으로, 이 모형은 종속변수와 두 개 이상의 독립 변수 간의 관계를 설명하는 데 사용된다. 다중회귀모형은 단일 회귀모형(single regression model)을 확장한 것으로 볼 수 있으며, 종속변수는 분석하고자 하는 현상이나 결과 변수로, 다른 변수들에 의해 영향을 받는다.

다중회귀모형에서는 각 독립변수마다 하나의 회귀계수가 존재하며,

22) AI 기법을 활용한 정수장 수질예측에 관한 연구(이승민, 2024)

이 계수들은 해당 독립변수의 단위 변화가 종속 변수에 미치는 영향을 표현한다. 다중회귀모형은 실제 데이터를 기반으로 하여 변수 간의 관계를 추정하고, 예측 및 설명을 목적으로 하며, 회귀계수는 해당 독립 변수가 종속 변수에 미치는 영향을 파악하는 데 사용되지만, 다중공선성 (multicollinearity)과 같은 문제를 고려하여 변수 선택과 모형 평가 과정에서 주의가 필요하다. 다중회귀모형은 여러 개의 독립 변수를 이용하여 종속 변수를 설명하고 예측하는 통계적 모델로 인공지능을 활용한 데이터 분석에서 널리 사용되며, 변수 간의 복잡한 관계를 이해하는 데 유용하다고 할 수 있다.

- 랜덤포레스트

랜덤 포레스트(Random Forest)는 머신러닝에서 매우 강력한 알고리즘 중 하나로, 다수의 결정 트리(Decision Tree)를 생성하여 예측을 결합함으로써 과적합(overfitting)을 줄이고 더 나은 일반화 성능을 제공하는 앙상블(Ensemble) 학습 방법이다.

앙상블 학습(Ensemble Learning)은 여러 개의 모델을 결합하여 하나의 모델보다 더 나은 성능을 내도록 하는 기법으로, 랜덤 포레스트는 많은 결정 트리들의 예측을 평균하여 예측 정확도를 높이는 방식으로 앙상블 학습을 구현한다.

결정 트리(Decision Tree)는 데이터를 기반으로 한 규칙 기반의 모델로, 각 노드에서는 하나의 변수에 대해 분할 기준을 설정하여 데이터를 분리한다.

랜덤 포레스트는 데이터에서 무작위로 샘플을 추출하여 여러 개의 부트스트랩 샘플(Bootstrap Sample)을 생성하고, 이는 각 결정 트리가 다양한 데이터로 학습하도록 돕는다. 각 결정 트리는 무작위로 선택된 변수(subset of features)를 사용하여 분할 기준을 설정하여 모델의 다양성을 증가시키고, 과적합을 방지한다. 랜덤 포레스트는 각 트리의 예측을 종합하여 최종 예측을 하며, 일반적으로 분류 문제에서는 각 트리의 예측을 다수결(majority voting)로, 회귀 문제에서는 평균으로 계산하게 된다.

랜덤포레스트는 과적합을 줄이고, 일반화 성능을 개선하며, 다양한 유형의 데이터를 처리하는 동시에 변수 중요도를 계산하여 각 변수의 기여도를 평가할 수 있다.

또한 랜덤 포레스트는 이해하기 쉽고, 다양한 문제에 적용할 수 있는 강력한 머신러닝 알고리즘으로, 대표적으로 분류(classification)와 회귀(regression) 문제에서 널리 사용되고 있다.

- LSTM

LSTM(Long Short-Term Memory)는 RNN(Recurrent Neural Network)의 한 종류로, 주로 시계열 데이터나 자연어 처리와 같은 연속적인 데이터에서 장기적인 의존 관계(Long-term dependencies)를 학습하는 데 사용된다.

일반적인 RNN은 단기 기억력 문제로 인해 장기적인 의존 관계를 처리하는 데 어려움이 있어, LSTM은 이를 해결하기 위해 설계된 모델로, 긴 시퀀스에서 발생할 수 있는 그래디언트 소실 문제(vanishing gradient problem)를 완화하고, 장기 의존성을 효과적으로 학습할 수 있다.

LSTM은 게이트라 불리는 세 개의 중요한 게이트를 사용한다. 이들은 시그모이드 함수를 사용하여 0과 1 사이의 값을 가지며, 정보의 흐름을 제어하고, 각 게이트는 시그모이드 출력과 선형 변환을 조합하여 정보를 필터링하고 제어한다. 이를 통해 LSTM은 데이터의 장기 및 단기 패턴을 모두 학습할 수 있다.

LSTM은 주로 시계열 데이터 예측, 기계 번역, 문서 분류, 감성 분석 등의 자연어 처리 태스크에서 사용되고 있고, 음성 인식, 텍스트 생성, 행동 인식 등 다양한 영역에서도 활발히 적용되고 있다.

즉, LSTM은 RNN의 한 종류로, 장기적인 의존 관계를 효과적으로 학습할 수 있는 구조를 제공할 수 있다. 게이트 메커니즘을 통해 정보의 흐름을 조절하고 셀 상태를 업데이트하여 복잡한 시퀀스 데이터를 처리할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 LSTM은 다양한 실제 문제에 적용되며, 특히 시계열 데이터나 자연어 처리 분야에서 높은 성능을 발휘할 수 있다.

6.2.2.2. AI 기반 잔류염소 예측모형 적용사례

- 수질 관측자료 수집

수질 관측 데이터의 수집 및 분석에는 여러 가지 한계가 존재한다. 각 정수장 처리 방식의 차이, 센서 또는 통신 오류, 청소 수행 등의 요인으로 인해 데이터에 결측치와 이상치가 포함될 수 있다. 이를 효과적으로 방지하기 위해 데이터 전처리 과정이 필요하다. 수질관측자료의 경우 시설, 계측 기계, 기후, 인력 등으로 인해 변수가 많이 발생하는 것이 특징이다. 이처럼 기존에 적용된 통계적 분석기법을 이용한 결측치 및 이상치 보간이 더이상 유효하지 않기 때문에 데이터의 전처리를 수행한다.

- ① 수집한 데이터셋의 각 변수별 발견된 결측치에 대해 선형 보간 방식을 이용하여 보간
- ② 각 변수의 시계열 그래프를 작성하고 자료의 패턴을 분석한 후 이상 수치가 확인되는 부분 제거
- ③ 각 변수의 이상치를 확인하여 이상치가 집중된 구간이 데이터셋에서 배제되도록 설정
- ④ 일정기간 기록된 데이터 중에서 정시 해당 자료만을 선택한 후 이를 일정기간 단위로 재구성

관련 연구에서는 정수 처리 과정의 염소 수준 변화를 확인하기 위하여 다양한 수질 지표 등을 조사하고 있고, 이러한 지표들로는 유입량(inflow)과 전도도(conductivity) 및 알카리도(alkalinity), 암모니아 농도(NH₃)와 수온(temperature), 염소 농도(sediment)와 탁도(turbidity) 및 pH, 유출수의 잔류염소 등이 포함된다.

- 모형 적용 및 평가

각종 수질데이터를 수집하여 분석한 후 잔류염소 관리 등에 필요한 침전지 유출수 잔류염소 농도 예측에 필요한 영향인자를 선정한 후 이를 토대로 랜덤포레스트와 인공신경망 및 다중 회귀모형 등을 적용하여 MAE와 RMSE 및 NRMSE 등의 평가지표를 통하여 예측성능을 비교한 후 평가한다.

관련 연구 대부분 랜덤포레스트 기반 예측모형의 정확도가 가장 뛰어난 것으로 확인되었고, 이어서 다중회귀모형과 LSTM 순으로 나타났다. 즉, 랜덤포레스트 예측모형이 목표값인 침전지의 유출수 염소 농도에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들을 효과적으로 적용하고 있음을 보여준다. LSTM이 강수량과 수위와 같이 시간적인 순서가 중요한 시계열 자료를 분석할 때 높은 성능을 보이나, 입력자료를 전처리하는 과정에서 시간 연속성의 훼손이 발생하는 경우 LSTM의 성능이 떨어진다. 이러한 결과는 정수장의 수질 관측 데이터에 대한 품질관리가 상당히 중요하며, 향후 해결되어야 할 문제임을 의미한다.

인공지능을 활용한 예측모델이 효과적으로 구축되고 운영되기 위해서 자료의 적절한 기간과 시간 간격을 설정하는 것이 필요하다. 특히, 잔류 염소의 특성이 반영될 수 있는 인자의 선택이 필수적이고, 모델의 성능은 정수 과정에서 수량 및 수질 데이터를 처리하는 방식에 영향을 받음과 동시에 관측자료의 품질에 따른 영향이 커지게 된다.

관측자료를 해석하는 것은 수처리 시설을 운영관리함에 있어 필수적인 요소로서 해당 절차는 복잡성 및 시간 소모가 많은 특징을 가지고 있다. 이러한 특징에 대해 데이터의 수집과 정리, 전처리, 알고리즘 선택과 최적화를 포함한 전체 과정에의 지능화가 필요하다.

7. 미국의 기후변화 대응 물관리 예측

지구온난화로 인한 강수 강도, 변동성이 증가하고 있어 홍수 및 가뭄으로 인한 피해도 증가할 것으로 예측되는 등 지구온난화 등 전 세계적인 기후변화로 인해 물 순환도 큰 영향을 받고 있다. 이와 같이 국제사회에서 기후변화와 물 간의 상관관계가 심각하게 논의되고 있고, 미국 등 선진국은 기후변화에 대응한 물관리의 중요성을 중대하게 인식하여 각종 대책들을 수립하고 있다.

기후변화로 인한 물관리 체계는 공급과 수요측면의 대책을 같이 고려할 필요가 있다. 수요측면에서는 물관리 대책을 수립하는 과정에서 활용할 수 있는 가상수질 흐름(virtual water flows)을 분석, 산업별 혹은 지역별 물 이용 실태를 분석하는 방법이 있다.

가상수질 흐름은 제품의 생산에 사용하는 물을 가상으로 추적하는 방식으로서 주로 산업연관모형과 산업별 물이용 행렬을 결합하여 각 지역이나 국제적 교역에 연계된 물 이용 현황을 분석하기 위해 적용되었다.

가상수질 흐름 분석을 통해 각 부분이 효율적으로 물관리 방안을 수립할 수 있을 뿐만 아니라 기후변화에 따른 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 물관리 정책을 수립하는데 도움을 줄 수 있다.

7.1. 기후변화와 수자원 관련 연구 현황²³⁾

기후변화와 수자원 관련 연구에서 경제성만을 분석한 과거의 연구는 단편적인 요소에서 경제적 가치를 평가하고 단기적 관점을 유지하는 한계점 등이 있다.

최근 해외에서 수행되고 있는 수자원 관련 연구들은 수질오염에 따른 생태계 문제나 환경적 측면에서 사회 및 경제에 미치는 영향을 파악하는 것으로 연구의 초점이 변하고 있다.

23) 기후변화에 대응한 효율적 수자원 관리: 수질오염 개선사업의 경제적 파급효과 분석(박창근, 2020)

특히 지구온난화로 인한 기온 및 수온의 상승은 수자원 양적 변화나 극한기후로 인한 각종 재해 유발, 수질 변화 등에도 영향을 주어 수인성 질환 등 질병 매개의 전체적인 흐름을 변화시켜 대중의 건강에 중대한 위협 요소가 될 수 있다.

기후가 변화함에 따라 수온, 부유 영양물질 등을 증가시켜 유해성 남조류 세균 등이 기존 예상 수치 이상 번식한다면 식수 관리, 어업 등에 부정적 영향을 미칠 수 있고, 담수 생태계와 연근해 수중 생태계는 기후변화의 영향을 받을 수도 있다

기후변화는 수질 이용 측면에 영향을 미치고, 지속이 가능한 물 이용을 위해서 높은 상하수도 보급률과 양질의 수자원 확보, 안정적인 재정투자, 친환경적인 토지관리, 수질 개선과 같은 대응정책 수립과 그 이행이 필요하다.

기후변화 관련 수자원 관리 분야의 최근 해외 연구사례를 살펴보면, 기후변화로 인한 수량 스트레스(물 유출량 추정)와 오염물질 등 인위적 요인이 하천 생태계 등에 미치는 영향평가를 통하여 수자원 관리에 적용할 수 있게 하였다. 시뮬레이션 모델을 적용하여 오염물질의 하천 생태계에 미치는 영향에 다수의 기후변화 시나리오를 적용하여 분석한 연구도 있으며, 수자원 관리 가치평가에서 장기간 호주 수자원에 대한 사회적 가치변화에 경제와 지속가능한 환경 측면에서 평가한 연구도 있다. 또한, 발트해 수질오염 관리에 요구되는 비용의 경제적 가치도 기후변화의 불확실성을 고려하여 평가하였다. 수질 악화가 주택가격 등에 미치는 부정적 영향을 공간 헤드닉 모델을 이용하여 분석하거나, 환경 보조금을 기준으로 수질오염 관리의 경제적 가치를 평가하기도 하였다.

과거의 산업연관분석이 지닌 고정계수 한계를 극복하기 위해 베이 지안을 기반으로 한 유사 모형인 탄력적 산업연관모형(Flex-IO)이 구축되고 탄력적 산업연관 방법론이 제안되었다.

또한, 과거의 산업연관분석이 고정계수를 활용하기 때문에 미래의 새로운 효과를 반영할 수 없는 단점 등을 보완하기 위하여 새로운

방법론이 개발되었다. 2개의 산업으로 구성된 직관적 모형을 통하여 고정계수를 갱신할 수 있도록 투입-산출 계수를 새롭게 구축하는 방법도 제시되었는데, 해당 분석은 민간 부문 수요가 경제구조 변화에 끼치는 영향을 산업연관 방법론 등에 적용하였다.

탄력적 산업연관 방법론은 동시에 수요와 공급 측면을 활용함으로써 산업연관계수 고정성을 동태적으로 변환하는 방법이고, 분석을 원하는 시기에 산업연관표를 갱신하도록 하여 투자나 경제구조 변화에 따른 산업연관 관계 변화를 분석하게끔 해준다. 특히 가격의 변동이 불안정하거나 가격의 변동에 따른 경제구조의 변화를 반영하기 어려운 일반균형모델의 단점을 극복하는 동시에 수요와 공급을 모두 고려한다는 점에서 산업연관 계수를 추정하기 위한 일반균형적 접근이라고 할 수 있다.

7.3. 미국의 국가기후평가보고서²⁴⁾의 물 분야(chapter 3) 주요내용

미국의 지구변화연구법 제106조는 과학적인 평가를 규정하여 4년 이하의 주기로 그동안의 연구결과를 통합하여 기후 변화의 현재 현황을 분석하고 향후 수자원 등에 대한 영향을 예측하는 국가기후평가보고서(NCA : National Climate Assessment)를 대통령과 의회에 제출하도록 하고 있다.

해당 보고서에 따르면, 지구온난화와 강수량의 변화는 가뭄을 심화시키고, 폭우를 증가시키며, 수질을 저하시키는 등 지역에 다양한 영향을 끼친다.

미래 온난화는 물 공급에 대한 스트레스를 가중시키고 미국의 일부 지역에서 물의 가용성에 부정적인 영향을 미칠 것이다. 눈과 비의 상대적 양과 시기의 변화는 일부 지역의 용수공급 가능량과 수요량의 불일치를 일으켜 물부족의 문제를 야기하고, 남서부와 북서부의 수력발전 생산의 안정성을 위협하기도 한다.

24) National Climate Assessment, NCA5(National Academy of Sciences(National Academy of Sciences,2020)

지하수의 고갈은 미국의 많은 지역, 특히 남서부와 남부 대초원 지역의 가뭄 위험을 악화시키고 있다. 그리고 미국의 믿을 수 있고 안전한 물 공급은 해수면 상승으로 인해 가뭄, 홍수, 소금물 오염의 위협을 받고 있다. 대부분의 미국 발전소는 냉각을 위해 지속적인 용수 공급에 의존하고 있으며, 운영은 용수 가용성과 온도 증가의 변화에 의해 영향을 받을 것으로 예상된다.

과거의 강수나 배수 환경 조건에 맞춰 설계된 수자원 인프라는 노화되어 기후변화의 위협에 노출되어 있다. 결국 기후변화를 감안한 물관리 전략은 물과 관련된 현재와 미래의 모든 위험을 줄이는 데 도움이 될 수 있지만 그 실천에는 여러가지 어려움이 존재한다.

홍수와 가뭄의 효과적인 관리와 함께 개인, 지역사회, 생태계에 깨끗한 담수를 안정적으로 공급하는 것이 인간의 기본이다. 그리고 생태학적 건강. 수도 부문은 또한 경제의 중심이며 농업, 에너지, 도시 환경, 산업을 포함한 많은 다른 부문의 회복력에 크게 기여한다.

수계는 미래의 기후 변화 없이 상당한 위협에 직면해 있다. 제한적인 지표수 저장은 장기 가뭄 예측을 이용하고 용도와 분지를 가로질러 물을 교환하는 제한된 능력뿐만 아니라 미국의 많은 지역에서 상당한 수증기 감소로 이어졌다. 전국적으로, 많은 중요한 물과 폐수 인프라가 그것의 유용한 삶의 끝에 가까워지고 있다. 현재까지 미국 수자원 기반시설(댐, 제초, 수로, 하수구, 상하수도 및 폐수 분배 및 처리 시스템 포함)의 기후 관련 취약성, 잠재적 피해, 또는 재건 및 복구 비용에 대한 종합적인 평가는 존재하지 않는다.

미생물의 정보(얼음 속이나 나무 고리에서 파생된 과거의 기후의 재구성)는 지난 500년 동안 북아메리카가 때때로 수십 년 동안 지속된 뚜렷한 습기/건조한 정권 교체를 경험했다는 것을 보여준다. 이처럼 전국 각지의 극심한 홍수나 가뭄에 대한 장기간 노출은 20세기에 경험한 사건에 비해 이례적이기 때문에, 그것들은 아직 물 관리 원칙과 관행에 통합되지 않았다. 예상되는 미래의 기후변화는 많은 지역에서 이러한 위험을 악화시킬 것이다.

물 기획과 관리에 대한 중심적인 도전은 20세기에 경험했던 것보다 범위가 넓은 그럴듯한 미래 기후 조건을 계획하는 법을 배우는 것이다. 그렇게 하려면 단 하나의 방법 대신에 많은 가능한 미래에 대한 계획을 평가하고, 실시간 모니터링 및 예측 제품을 통합하여 극한 상황이 발생했을 때 더 잘 관리할 수 있도록 하고, 지구 변화에 대한 최선의 가용 지리 과학 기반의 이해로 정책과 엔지니어링 원칙을 업데이트 해야 한다.

이는 역사적 관행에서 벗어난 것을 의미하지만, 주요 광역 상수도 사업자와 미 육군 공병단 등 대규모 수질관리기관이 실시한 최근의 적응 대응 사례들은 매우 효과적이라고 평가할 수 있다.

8. 한국과 미국의 스마트워터그리드

ICT, IoT, 빅 데이터, 인공지능(AI), 디지털트윈 등 4차산업 첨단 융합기술을 물관리에 도입하는 스마트 물관리가 확산 중이다. 세계 각국은 스마트 기술을 물관리 전반에 적용하여 실시간으로 물 생산과 수요, 분배를 분석·예측하여 물관리를 효율적으로 관리하는 스마트 워터그리드(SWG)를 구축하고 있다. 미국은 국가단위의 효율적 물공급 네트워크를 구축하는 방향으로 SWG를 추진하여, 이를 통해 물 관련 사회적 비용을 효과적으로 절감하고 있다. 유럽도 미래도시의 물관리를 위해 12개국에 참여하는 SWG 사업을 추진하고 있다.

최근에는 디지털 기술 발달 등으로 글로벌 '디지털 워터 플랫폼' 선점을 위한 다양한 주체들의 경쟁이 본격화되고 있다. 베을리아, Waternet, 메코룻, PUB 등 글로벌 또는 강소 물기업들은 기존 물산업 영역을 뛰어넘어 '디지털 워터 플랫폼'에 본격 진출 중이며, 유럽연합(EU)은 민관합작투자사업(PPP)으로 개발한 오픈소스 기반의 스마트 시티를 위한 클라우드 플랫폼 구축을 추진 중에 있다.

8.1. 국내의 스마트워터그리드 추진 현황

한국의 「물관리기본법」에서는 '통합물관리'의 개념을 세 가지로 제시하고 있다. 첫 번째, 물순환 과정의 모든 형상의 물(강수, 지표수, 지하수(토양수, 중력수, 모관수), 증발산(기체))을 모두 고려하여 통합 관리해야 한다는 것이며, 두 번째, 물순환 전주기를 고려하여 정책을 추진해야 하는 것, 세 번째, 자연환경, 경제·사회에 미치는 영향, 수량 확보, 수질 보전, 재해 방지의 물관리 목적을 종합적으로 고려하는 것으로 제시되어 있다.

이에 미래 물산업 창출을 위해 2012년 7월 SWG 연구단이 구성되었으며, SWG연구단은 1과제(수자원 확보/분배), 2과제(물 수급 평가 및 통합관리), 3과제(ICT기반 양방향 최적운영)로 구성되어 있다. 1과제에는 1개의 협동과 4개의 공동기관, 21개의 참여기업, 4개의 위탁기관으로 구성되어 있고, 2과제에는 1개의 주관기관과 3개의 공동기관, 10

개의 참여기업으로, 3과제에는 1개의 협동기관과 4개의 공동기관, 8개의 참여기업으로 구성되어 있다. 1세부에서는 신도시 수자원 연계활용을 위한 지능형 수자원확보 기술 개발을, 2세부에서는 수자원 최적 활용을 위한 지능형 유역물관리 플랫폼 개발을, 3세부에서는 Smart Water Grid 맞춤형 ICT기반 물정보 관리 기술 개발을 목표로 하고 있다.

8.2. 미국의 스마트워터그리드 추진 현황

현재 미국의 수자원관리 임무는 연방정부, 주정부, 전문기관인 미공병단, 개척국, 지질조사국, 환경청(EPA) 등으로 산재되어 있다. 연방정부는 최상위계획수립·물 배분을 총괄하며, 주정부는 수자원정책을 수립하여 적용하며, 환경청은 기술지원의 역할을 하고 있다.

미국은 주정부 단위로 통합물관리가 시행되고 있으며, 중앙기관이 수질관련 규제를 관장하고, 집행은 주 정부에 의해 이루어지는 구조로 물관리 권한은 대부분 주정부에 있고 연방정부의 권한은 다소 약한 실정이다.

최근 물관리 중요성과 수자원 관련 대형 사업 시행의 필요성이 대두되어, 연방정부 차원의 물관리가 중요해지고 있으며, 미국 국가물위원회(National Water Commission)는 최근 권고안으로 물 관련 기관들에게 통합 운영 지침을 내렸다. 또한, 에너지정책법, 에너지 및 수자원 통합법 등 에너지-물 넥서스에 관심을 가지고 관련 DB 등의 자료를 수집하고, 법제 개선을 추진 중에 있다.

또한 미국은 우리나라의 통합물관리와 매우 유사한 개념인 “Total Water Management(전체물관리, TWM)”라는 개념을 도입하였다. TWM이란 물순환을 분석하여 다양한 물문제의 비용 효과적인 다목적·다혜택 해결책(multi-purpose, multi-beneficial solutions)을 찾아내는 전체론적(Whole-System) 물관리 접근방법으로 정의하고 있다. 주요 물순환 관리 범위(Scale)는 도시 중심이며, 일부는 유역 중심으로 진행되기도 한다. TWM 관리의 목표는 주민이 필요로 하는 공중보건 및 환경을 보호하기 위해 적절하고 지불가능하며, 비용효과적이면서 지속

가능한 도시 물 서비스를 제공하는 것이다. 물순환 주요 관리 전략은 도시의 주요 물자원인 상수(Potable Water), 하수(Wastewater), 강우유출수(Stormwater)를 종합적으로 관리해 도시의 침수 방지, 수질관리, 물자원을 확보하는 것이다.

구체적인 물순환 전략으로 물수요관리 전략- 누수 및 수요 저감, 물 공급관리 전략-급수체계 조정, 대체수자원 이용 확대 전략- 빗물이용(rain harvest), 하수재이용(recycle), 중수도(graywater), 강우유출수 재이용(reuse) 및 함양, 하수도 및 공공수역으로 유입되는 강우유출수 저감 전략으로는 LID, GI, 분산식 침투시설, 다기능 인프라 도입, 갈수기 도시 우수 처리 시설(Dry weather runoff treatment plants), 사용 용도에 맞게 처리된 물 사용 (Fit-for-purpose water use) 등이 있다.

9. 물관리 방안에 대한 AI 도입의 일반적 한계

9.1. 데이터 품질 문제

먼저, 관련 데이터의 부족 문제가 있다. 인공지능 모델은 대량의 데이터를 필요로 하지만, 국내에서는 데이터 수집이 어려운 경우가 많다. 특히 공공서비스는 그 수요와 공급의 범위가 제한되어 있어 공공서비스에 적합한 동시에 인공지능 학습에 필요한 데이터의 양에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해서는 국내에서 데이터를 충분히 수집하고 이를 활용할 수 있는 인프라 구축과 제도적 대안이 필요하다.

그리고 인공지능 모델은 데이터의 편향성이나 오류 등으로 인해 잘못된 결정을 내릴 가능성이 있다. 특히, 대량의 데이터를 다루는 경우, 데이터에 편향성이나 오류가 있는지를 파악하는 것 자체가 어려운 경우가 많다. 학습 데이터가 한쪽에 치우쳐져 있거나 잘못된 데이터가 포함되어 있을 경우, 결과가 편향될 수 있으므로, 학습 데이터의 품질을 향상시키기 위한 투명하고 공정한 데이터 수집과 처리 과정이 필요하며, 지속적인 관리가 동반되어야 한다.

데이터의 품질과 신뢰성에도 문제가 있을 수 있다. 인공지능 시스템은 데이터를 기반으로 작동하기 때문에, 데이터의 질과 신뢰성이 매우 중요하다. 하지만 수집된 데이터는 사람에 의한 실수, 시스템의 이전 및 개선 과정에서 발생할 수 있는 정합성 오류, 오래된 정보의 오류 등 다양한 오류가 섞일 가능성이 높고, 그것이 인공지능 시스템의 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 데이터의 질과 신뢰성을 유지하기 위한 체계적인 데이터 관리 시스템이 필요하다. 현재 공공기관이 가지고 있는 데이터는 주로 정형적 데이터에 국한되어 있다. 최근 사물인터넷이나 이미지, 영상 등의 정보가 활발히 활용되고 있으나, 각 서비스에 국한되어 제한적으로 이용될 뿐, 활용도를 높이기 위한 관리는 미비하다. 따라서 공공에서도 데이터 웨어하우스, 데이터 레이크하우스 등 비정형 데이터를 인공지능의 학습 등 다양한 분야에 활용할 수 있도록 정형 및 비정형 데이터를 저장하고 관리하기 위한 시스템의 구축과 관리가 필요하다.

9.2. 기술적 한계

인공지능 기술은 아직 완전히 성숙한 기술이 아니며, 여전히 정확도와 신뢰성 문제가 있다. 적대적 학습의 경우, 사람의 눈으로 쉽게 파악이 가능하다는 점에서 초기에는 합성곱신경망과 이미지 처리에서 그 문제가 노출되었으나, 연구자들은 순환 신경망과 자연어 처리 등 다양한 분류 응용에서 동일한 문제가 있음을 수학적으로 증명한 바 있다.

그리고 인공지능 모델의 해석 가능성이 제한적인 문제가 있다. 인공지능 모델이 내린 결정의 근거를 파악하기 어렵다는 것은 공공서비스에서 큰 문제가 될 수 있다. 공공서비스는 그 특성상 책임소재에 민감하며, 국가가 이해 당사자이기 때문에 신뢰성이 그 무엇보다 중요하다. 정책의 적용에 있어 법률적인 문제가 발생할 수 있는 경우에는 인공지능 모델의 해석 가능성을 보장해야 한다.

또한, 알고리즘 투명성과 공정성 문제도 발생할 수 있다. 인공지능 알고리즘의 복잡성과 불투명성으로 인해, 사용자들은 결정 과정을 이해하기 어렵다. 특히 최근 각광받고 있는 딥러닝은 태생 자체가 입력과 출력 간의 과학적 추론을 포기하고 기계가 학습을 통해 유추하도록 만들어진 알고리즘이다. 딥러닝의 성능이 비약적으로 향상된 데에는 입력과 출력 사이에 무수히 많은 양의 레이어와 노드를 추가하여 거미줄 형태로 복잡하게 관계를 구성한 다음, 엄청난 양의 데이터를 학습에 투여하여 학습 데이터들이 가질 수 있는 확률적인 인과관계를 사람이 이해할 수 없는 수준의 양으로 나누었기 때문에 딥러닝이 결론을 도출한 과정을 과학적, 수학적으로 풀 수 없다.

10. 결론

최근 해외에서는 수자원 관리 분야에서 인공지능 기술 사용에 있어 비약적인 발전이 이루어지고 있으나, 기후변화와 지구온난화로 인한 심각한 자연재해의 증가는 수자원 관리에 심각한 위협을 가하고 있고, 결과적으로 수자원의 변동성을 특성화하고 예측하기 위해 인공지능 모델을 탐색하는 모델 등이 최근 급증하고 있다.

그러나 우리나라는 물관리 일원화 등 행정체계의 일부 개편에도 불구하고 상·하수도는 환경부, 우수저류시설은 행안부, 하천은 지자체별로 관리 권한이 구분되어 있는 등 여전히 물관리 업무가 중앙부처 및 유역별 소속기관, 지자체 등으로 분산되어 있고, 물관리 체계가 과거 아날로그(Analog) 방식에서 디지털(Digital) 방식으로 급격히 전환 중에 있는 데도 관련 법령, 제도 등은 기존 체제를 답습하고 있는 한계를 가지고 있다.

또한, 물 정보가 기관별로 수집, 관측·관리되고 있어 물관리 정책 결정시 정보 단절이 발생하고, 개별법에 근거한 데이터 수집으로 이용자 관점에서의 낮은 활용성 및 물관리 대부분 정부 정책 주도로 추진되고 있어 다양한 이해관계자의 의견수렴 부족 등 제도적 한계가 있다고 볼 수 있다.

한편 기후변화에 따른 우리나라의 평균 강우량 변동 추이를 살펴보면, 최근 특정 지역에 짧은 시간 동안 많은 강우가 내리는 국지성 집중호우가 발생하는 등 강우의 불규칙성이 크게 증가하고 있어, 하천 주변의 구조적·비구조적 홍수방어 대책을 제시하기 위해 하천유역 주요 지점별 홍수량 등을 정확하게 산정할 필요가 있다. 즉, 저수지 등 수원의 수위변화를 예측하기 위해 인공지능을 기반으로 한 예측모델을 개발할 필요성이 커지고 있다. 기존의 수치모형 등은 예보 등을 위한 시간 확보 등에 제한이 있고 실증되지 않은 공간적 불확실성으로 인해 예측이 정확하지 않을 수 있어, 수치모형이나 RNN 기법을 이용한 모형을 사용하기보다는 LSTM 기법을 사용한 예측모형이 정확도와 신속도의 측면에서 더 신뢰성이 있다고 판단된다.

특히, 최근 하천 등의 수위예측을 위해 인공신경망으로서 외생변수를 활용하고 있는 비선형 자기회귀 신경망 모델을 사용하는 것이 일반적인 추세이고, 인공신경망과 유전자 알고리즘 및 뉴로-퍼지 모델을 사용한 연구도 다양하게 이루어지고 있는데, IDNN, TDNN, NARX 등 동적 인공신경망 활용한 수위예측 모델들을 개발할 필요가 있다.

한편 해외에서는 인공지능 알고리즘 등을 활용하여 정수처리과정에서 염소 수치 등을 예측하고, 각종 약품의 투입량을 자동으로 제어하는 모델을 이용하여 수자원 처리과정의 개선과 과거 인력으로 관리하여 발생한 문제점을 개선하고자 하는 연구가 진행되고 있어, 인공지능 알고리즘을 정수처리 공정 등에 적용하기 위해 인공지능 기반 모델인 다중회귀모형과 랜덤포레스트, 서포트 벡터 머신, XGBoost, 인공신경망, 장단기 기억 등을 활용할 필요가 있다.

그리고 미국은 지구변화연구법에 따라 과학적인 평가를 규정하여 4년 이하의 주기로 그동안의 연구결과를 통합하여 기후변화의 현재 현황을 분석하고 향후 수자원 등에 대한 영향을 예측하고 있는데, 우리나라도 기후변화에 능동적으로 대응할 수 있도록 수질관리 정책을 과학적인 방식으로 수립할 필요가 있다.

또한, 4차산업 첨단 융합기술을 통한 스마트워터그리드 추진을 위해 물 기반시설 실태조사를 통해 시설제원, 노후도, 점검·보수보강 이력 등을 DB화하고, 구축된 자료를 바탕으로 빅데이터 분석 등을 통해 취약지역·시설요소를 과학적으로 규명할 필요가 있다.

물 기반시설 실태조사로 수집된 자료를 DB화하여 물 관련 행정기관의 의사결정지원 시스템으로 개발하고, 이용자별 정보 접근 수준을 부여하여 보안성을 강화 또한 추진하여야 한다.

참고문헌

혁신성장을 위한 사람 중심의 4차 산업혁명 대응계획(4차산업혁신위원회, 2017)

한국하천일람(환경부, 2021)

우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2023)

기후위기대응 홍수방어기준 수립연구 최종보고서(환경부, 2018)

도시침수 관련 통계분석 및 위험요인 분석 연구(감사원, 2021)

AI 기법을 활용한 정수장 수질예측에 관한 연구(이승민, 2024)

하천 수위예측 알고리즘 개발-비정형 자료의 활용성 제고(이승민, 2020)

기후변화에 대응한 효율적 수자원 관리: 수질오염 개선사업의 경제적
파급효과 분석(박창근,2020)

도시침수 해석을 위한 동적 인공지능망의 적용 및 비교(김현일, 2020)

Government by Algorithm(Standford, 2023)

The Fourth Industrial Revolution(Klaus Schwab, 2016)

National Climate Assessment, NCA5(National Academy of Sciences(National
Academy of Sciences,2020)

Artificial Intelligence for Surface Water Quality Evaluation, Monitoring
and Assessment(Rishi Rana 등 5인, 2023)

Prediction of Water Level in Lakes by RNN-Based Deep Learning
Algorithms to Preserve Sustainability in Changing Climate and
Relationship to Microcystin(Serkan Ozdemir, Sevgi Ozkan Yildirim, 2023)

A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation(Tran and Song, 2017)

Comparison of ANN Approach with 2D and 3D Hydrodynamic Models for Simulating Estuary Water Stage(Chen, W. B., 2012)

Prediction of Water Level in Lakes by RNN-Based Deep Learning Algorithms to Preserve Sustainability in Changing Climate and Relationship to Microcystin(Serkan Ozdemir, 2022)

Application of Machine Learning in Water Resources Management: A Systematic Literature Review(Fatemeh Ghobadi, 2021)

Trends and development in technology-enhanced adaptive/ personalized learning(Xie, H. C. 2019)

Applications of hybrid wavelet - artificial intelligence models in hydrology(Baghanam, A.H., 2019)