

물 순환 개별 요소의 결합을 통한 통합 도시 물 순환 시스템 개발 및 적용

Development and Application of An Integrated Urban Water Cycle System by Combining Water Cycle Elements

정건희* · 옥원수** · 유도근*** · 김극태**** · 전환돈*****

Chung, Gunhui*, Ohk, Won Soo**, Yoo, Do Guen***, Kim, Geuktae****, and Jeon, Hwandon*****

Abstract

Smart city in water resources area attempts are being made by establishing an integrated urban water cycle model for a stable water supply and efficient water management in the city. Accordingly, the need for simulation and integrated management of water consumption in cities is increasing. If it is possible to predict and respond in advance to consumers' water consumption, more efficient urban water resource management will be possible based on river intake. Therefore, in this study, an integrated urban water cycle model was constructed that links river intake, water purification plants, retention tanks, water distribution, sewage pipe networks, sewage treatment plants, and river discharge of treated water. It was developed using C++, and was built by linking the modules of the water intake pump station, retention tank, water purification plant, sewage treatment plant, water supply pipe network, and the sewage pipe network. Among them, the water intake pumping station and retention tank were developed independently, and the other modules were linked with commercial software such as WaterFlow, MassFlow, EPANET, and SWMM. The model measures data such as water quality factors and flow rates for each module, displays the operation status, and enables linkage for each module, even when the measurement time interval is different. In addition, warnings and error messages were generated when a problem occurred during the operation of each module. To verify the applicability of the developed integrated model, the change in the water level of the retention tank was calculated by simulating consumer water consumption. As a result, it was confirmed that the water level change in the retention tank was proper, which meant that the operation changed from the intake pumping station. The developed model is expected to be used as an integrated urban water cycle model in the future.

Key words : Integrated Urban Water Cycle Model, EPANET, MassFlow, SWMM, WaterFlow

요 지

도시의 안정적인 물 공급과 효율적인 물관리를 위해 도시 물공급 시스템을 관리하고 운영하기 위한 시스템을 구축하여 수자원 분야의 스마트시티 시도가 이뤄지고 있다. 이에 따라, 도시의 물 사용량 모의 및 통합 관리의 필요성이 증가하고 있다. 하천 취수에서부터 수용가의 물 사용량을 예측하고 미리 대응할 수 있다면, 더 효율적인 도시 수자원 관리가 가능할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 하천 취수, 정수장, 배수지, 상수 및 오수관망, 하수처리장, 처리수의 하천 방류까지를 모두 연계한 도시 물 순환 통합 모형을 구축하였다. C++을 이용하여 개발하였으며, 취수펌프장, 배수지, 정수장, 하수처리장, 상수관망, 오수관망의 모듈을 연계하여 통합모형을 구축하였다. 이 중 취수펌프장과 배수지는 자체적으로 개발하였으며, 나머지 모듈을

*정회원, 호서대학교 건축토목공학부 부교수(Tel: +82-41-540-5794, Fax: +82-41-540-5798, E-mail: gunhuic@gmail.com)

Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University

**정회원, (주)지오엔소프트 대표이사(Tel: +82-33-243-5303, Fax: +82-33-243-5305, E-mail: wsohk21@gmail.com)

Member, CEO, Geonsoft Co.

***평생회원, 수원대학교 건설환경공학전공 조교수(Tel: +82-31-229-8676, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: dgyoo411@suwon.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

****정회원, 수원대학교 환경에너지공학전공 조교수(Tel: +82-31-229-8355, Fax: +82-31-220-2533, E-mail: kkt38@suwon.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Environmental Energy Engineering, The University of Suwon

*****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-2-970-6501, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

WaterFlow, MassFlow, EPANET, SWMM 등 상용 소프트웨어를 연계하였다. 연계된 도시 물 순환 통합 모형은 개별 모듈 별로 수질인자 및 유량 등의 자료를 계측하고 운영 상태를 표시할 수 있도록 하였으며, 계측시간 간격이 다른 경우에도 모듈 별 연계가 가능하게 하였다. 또한 각 모듈 별 운영 시 문제가 발생하면 경고 및 오류 메시지 등이 생성되도록 하였다. 개발된 통합모형의 적용성 검증을 위해 수용가의 물 사용량을 모의 발생시켜 배수지의 수위가 변화하는 것을 계산하였다. 그 결과, 배수지의 수위 변동이 적절하게 이뤄지는 것을 확인하였으며, 이는 취수펌프장에서부터 운영의 변화가 발생하였음을 의미하였다. 개발된 모형은 향후 도시 물 순환 통합모형으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 도시 물 순환 통합모형, EPANET, MassFlow, SWMM, WaterFlow

1. 서론

도시의 안정적인 물 공급을 위해 취수량, 정수량, 송·배수량, 물 사용량의 계측 및 관리가 필수적이다. 환경부에서는 10월 5일 물관리 일원화 이후 처음으로 ‘국가수도기본계획’을 수립하여 2022년부터 2031년까지 수도 분야 국가 계획을 수립하였다. ‘국가수도기본계획’은 안전한 물 이용체계 구축 및 지속가능한 수도서비스 실현을 목표로 하고 있으며, 가뭄 및 수도 사고 피해 최소화를 위해 댐에 의존하는 수원을 하·폐수 재이용, 해수 담수화 등 다양한 대체 수자원을 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다(ME, 2022).

이처럼, 도시의 지속가능한 물공급을 위해서는 수요자 기반의 물 수요 관리 정책을 수립해야 하며, 이는 대부분 수요량 모니터링 및 맞춤형 물공급 계획 수립을 포함한다. 그러므로 물 공급량 추정 및 수요량 예측에 대한 연구(Koo et al., 2005; Alvisi et al., 2007; Lee et al., 2009)를 다수 진행하여 도시의 안정적인 물공급을 위한 노력을 하였다. 이는 주간, 일일 물사용량 주기를 고려하여 물 수요량을 정확하게 예측하고, 물부족이 일어나지 않도록 하기 위한 것이다.

그러나 도시의 물 공급량 계획 및 물 순환 모의를 위해서는 하천 취수, 정수, 급·배수, 하수처리 등 모든 요소를 통합 관리해야 궁극적으로 안정적인 모델 구축이 가능하게 된다. 이를 위해 Chung and Ohk (2020)은 상수관망(EPANET)과 오수관망(EPA-SWMM)을 연계하는 모형을 Open-Modelica를 이용하여 개발하고 상수 사용량에 따른 오수전환율을 적용하여 오수관망 모의를 시도하였다. 도시 물순환 모형 개발을 위해 상수관망과 오수관망을 결합하여 초기 시도한 것은 도시 물사용의 대부분은 일반적으로 생활용수이기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이, 도시 물순환 통합 모형 구성을 위해서는 상수관망 및 오수관망의 결합 뿐만 아니라, 도시 물순환 요소 전체를 결합해야 한다. 그러나 개별 요소들의 모형 자체도 간단한 수식으로 표현되는 것이 아니라, 모형의 형태를 띠고 있기 때문에 도시 물순환 요소 전체 결합을 시도할 경우에는 모형 결합 오류로 인한 결과값 오류를 미리 예상하고 예방해야 한다. 예를 들어, 상수관로의 배수

및 급수 관로는 유량의 변화가 매 시각 크기 때문에, 10분 간격으로 유량을 계측하여 저장하는 경우가 많다. 그러나 정수장이나 하수처리장에서는 유량의 변화가 크지 않기 때문에 하루에 한번 정도 유량을 계측하거나 방류 수질을 측정하는 경우가 많다. 이렇게 시스템의 특성이 다른 경우, 연계하여 만든 통합 시스템의 구조를 사전에 숙고하지 않으면, 개별 요소의 특성을 통합모형이 반영하지 못하고, 계산 결과가 실제와 맞지 않는 경우가 발생할 수 있다.

아직 도시 물 순환 요소 모두를 결합하여 통합모형을 만든 사례는 없었기 때문에 이와 같은 요소들의 결합에 대한 고민도 많지 않았다. 또한 물 수요관리를 위한 물사용량 저감이나 비상시 탄력적인 물공급을 위해서는 개별 요소들을 모의하고 운영할 수 있는 시스템 개발이 이뤄져야 한다. 예를 들어, 물 수요관리를 위해서는 물 사용량을 정확히 계측하고, 물 절약 기법 도입이나 수요량 예측을 통해 효과적인 물 공급 계획 수립에 이바지해야 한다.

본 연구에서는 Chung and Ohk (2020)에서 개발했던 상수 및 오수관망 결합 모형을 Visual C++ 환경에서 다시 개발하고, 하천 및 저수지에서의 취수, 정수장에서 수처리, 배수지를 통한 급수와 배수, 하수의 이송, 하수처리장에서의 수질정화, 하천으로 처리수의 방류를 모두 연계한 모형을 개발하여 물공급 상황을 모의하였다. 또한, 모형의 개발을 위해 물 순환 요소들을 통합하는 과정에서 개별 요소들이 가지는 특성을 파악하고, 연계하기 위해 계측 및 모의 시간 간격에 따른 모형 결합 및 결과 도출 방법을 제시하였다.

2. 도시 물 순환 통합모형

2.1 도시 물 순환 통합모형의 구성

우리나라의 생활용수는 주로 지방 및 광역상수도로 공급되며, 2019년 상수도 통계에 따르면, 우리나라의 상수도 보급률은 99.3%이다(National Waterworks Information System, 2021). 2019년 상수도 통계에 따르면, 수도물 공급시설인 상수도관은 약 22만 km이며, 1인당 하루 수도물 사용량은 295 l였다. 2019년 말 기준 전국 161개 지방상수도사업자(특·광역시 7개, 특별자치시 1개, 특별자치도 1개, 시 75개, 군 77개) 및 1개 광역상수도사업자가 전체인구의 99.3%인 약

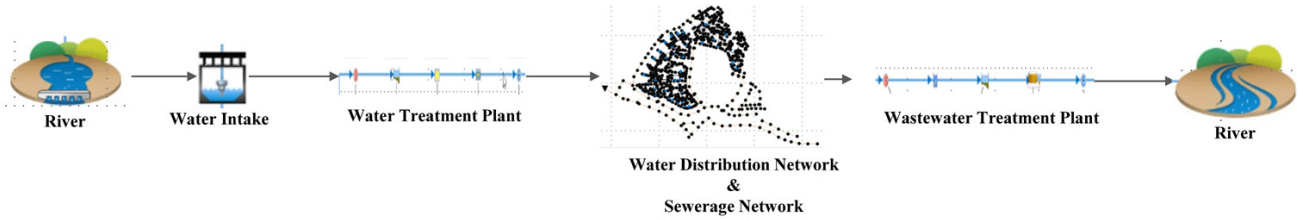


Fig. 1. Schematic Diagram of Integrated Urban Water Cycle Model

5천274만7천 명에게 상수도를 공급하고 있다. 그러므로 도시 물 순환 요소들을 구성하고 통합 물관리 모형을 개발하는 것은 매우 중요한 일이다.

Fig. 1은 도시 물 순환 통합모형의 구성 요소를 나타낸다. 하천(River)에서 취수하는 부분, 취수펌프장(Water Intake)에서 필요한 물을 취수하는 부분, 정수장에서 수처리를 통해 먹을 수 있는 물로 정화하는 부분(Water Treatment Plant), 정수된 물을 배수지로 보내 각 수용가로 송수하기 위해 준비하는 부분, 상수관로를 통해 수용가로 물을 공급하고 하수관로를 통해 사용한 물을 이송하는 부분(Water Distribution Network & Sewerage Network), 하수처리를 통해 수질을 정화하는 부분(Wastewater Treatment Plant), 하수처리수를 다시 하천으로 방류하는 부분(River)으로 구성된다.

2.2 QT UI 애플리케이션을 이용한 도시 물 순환 통합모형 개발

QT는 자바 프레임워크나 닷넷 프레임워크와 같이 Cross-Platform을 지원하는 프레임워크로 C++ 언어를 사용함에 따라 전적으로 객체 지향적이며 확장 가능하고 진정한 컴포넌트 프로그래밍을 지원한다. Qt Creator에 통합된 대화식 그래픽 도구인 Qt Designer와 함께 제공되는 위젯 모듈을 사용하여 GUI를 C++로 직접 작성할 수 있다.

상수도 시뮬레이션을 위한 EPANET의 C 소스와 하수도 시뮬레이션을 위한 SWMM의 C 소스를 상속받아서 일부 변환하여 사용하였다. EPANET의 비즈니스 로직을 유지하기 위해 EPANET Delphi에서 일부 변환된 메인 모델 클래스를 사용하고, SWMM의 비즈니스 로직을 유지하기 위해 SWMM Delphi에서 일부 변환된 메인 모델 클래스를 사용한다(Fig. 2).

모든 컴포넌트의 시뮬레이션 결과를 외부 데이터베이스 서버에 API를 통해 적재하는 온라인 모드와 자체 SQLite 데이터베이스에 저장하는 오프라인 모드를 지원하며, 두 가지 모드에서 동일하게 결과가 표출될 수 있도록 구성하였다.

사용자가 상수도 또는 하수도 관망 데이터의 inp 파일을 선택하면 프로그램이 EPANET 또는 SWMM 모델로 구문을 자동으로 분석하고 뷰어에 표시한다. 사용자가 시뮬레이션을 실행하면, 취수장의 취수량을 1시간 단위로 수집하여 정수장으로 전송하고, 정수장에서 정수된 유량은 체류시간

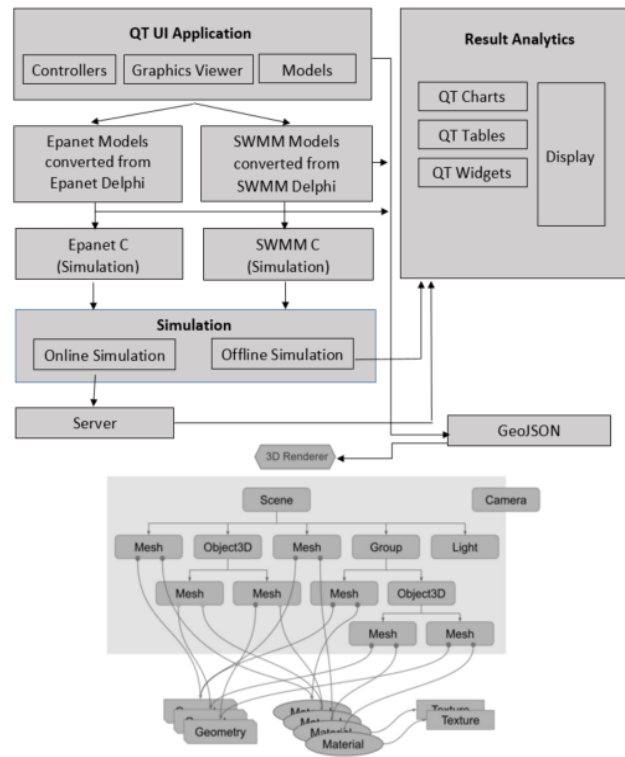


Fig. 2. Structure of Application Program

을 고려하여, 배수지로 유입된다. EPANET 상수관망 해석을 수행하여 10분 단위로 배수지의 유출량을 산정하여 배수지 수위 변화를 확인할 수 있도록 한다. 상수관망 절점과 오수관망 절점의 매칭 테이블을 이용하여 상수도 사용량을 연결된 오수관로 절점에 적용하고, SWMM 하수 관망해석을 실행한다. SWMM 관망해석을 통한 유출구의 오수관로 유량을 하수처리장 유입량으로 연계한다. 모든 취수장, 정수장, 배수지, 상수도, 하수도 및 하수처리장 시뮬레이션 결과는 통합관제시스템 또는 웹 대시보드에서 활용할 수 있도록 데이터베이스에 적재하였다. 사용자는 데이터베이스에 저장된 결과를 차트 등을 통해 시계열로 모든 컴포넌트의 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

3D 데이터는 네트워크의 데이터를 GeoJSON으로 내보내고, ThreeJS를 사용하여 3D 관로를 웹뷰에 표출하고, 밸브는 3D max 파일을 이용하여 3D 밸브를 관로 상에 표현한다.

사용자가 상수도 또는 하수도 관망 데이터의 inp 파일을 선택하면 프로그램이 EPANET 또는 SWMM 모델로 구문을 자동으로 분석하고 뷰어에 표시한다. 사용자가 시뮬레이션 실행하면 먼저 EPANET 상수관망 분석을 실행한 다음 SWMM 하수관망 분석을 실행하고 관망해석 결과를 뷰어에 표출한다. 사용자는 차트, 표를 통해 시뮬레이션 결과를 확인하고,

표출할 속성을 다중 선택할 수 있다.

정수장과 하수처리장 모듈은 ㈜유엔유에서 개발하여 정수장과 하수처리장 모의에 적용하고 있는 상업용 소프트웨어인 WaterFlow 모형과 MassFlow 모형을 이용하여 전체적인 수처리 시 반응조의 활동을 모의하였다(Figs. 3~4).

취수펌프장은 펌프의 제원을 이용하여 하천수위와 배수

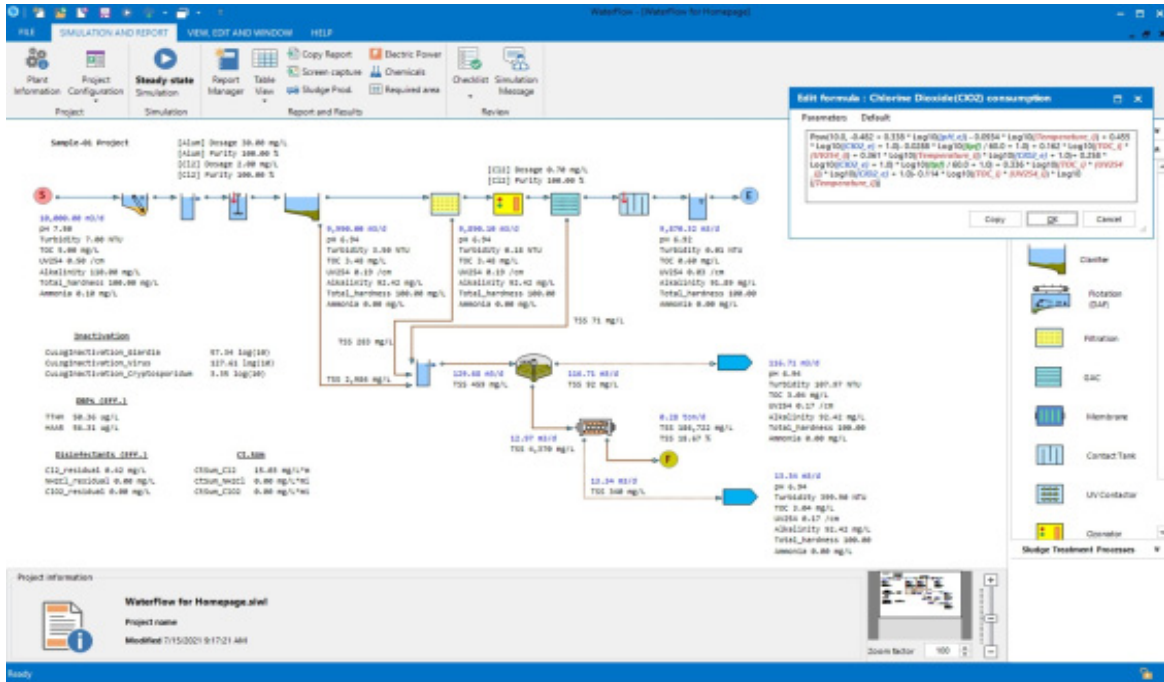


Fig. 3. GUI of WaterFlow for Water Purification Plant (<https://www.unu-inc.com/waterflow>)

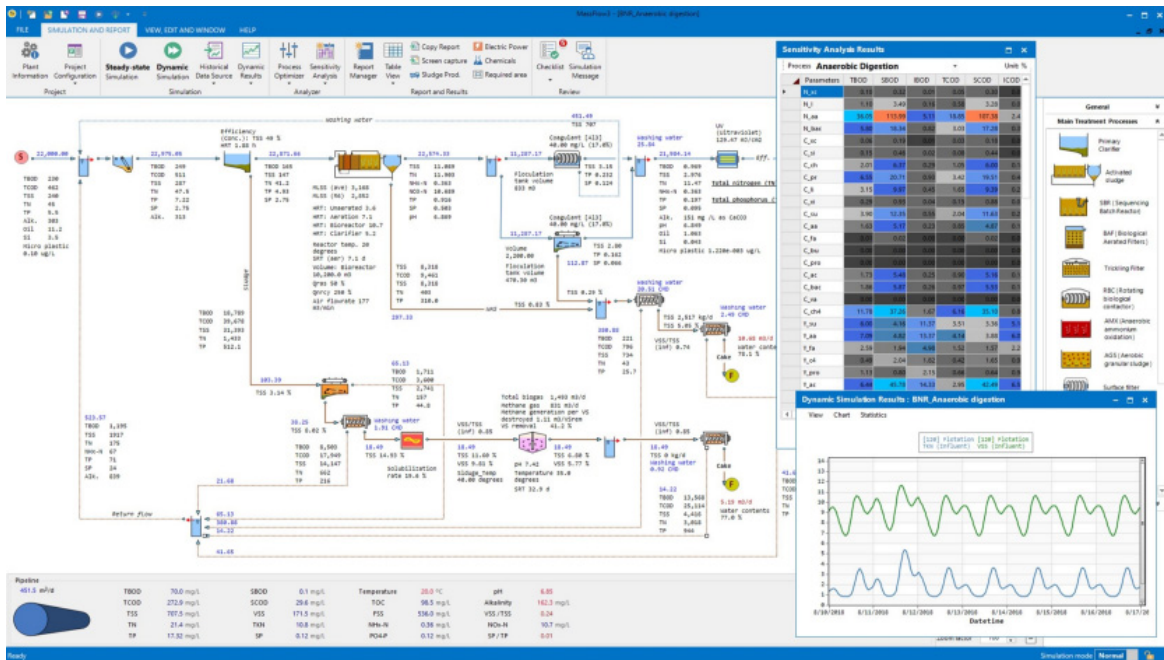


Fig. 4. GUI of MassFlow for Sewage Treatment Plant (<https://www.unu-inc.com/massflow>)

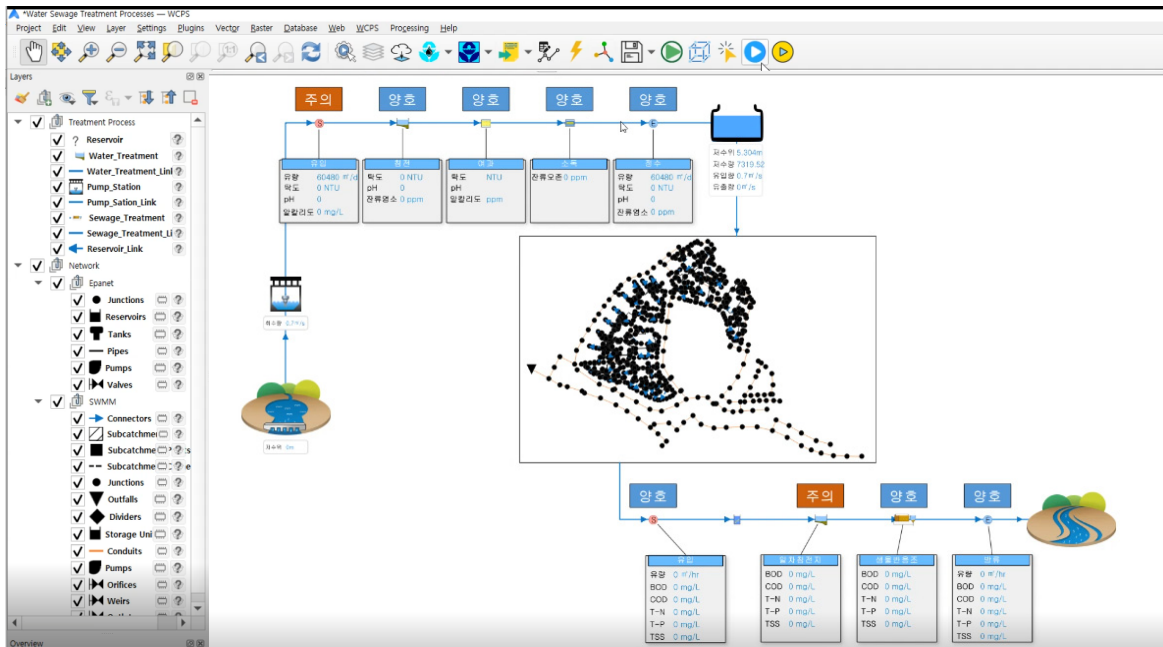


Fig. 5. Development of Integrated Urban Water Cycle Model

Table 1. Water Quality and Other Factors to be Observed for Integrated Urban Water Cycle Model

Module	Detailed process	Water quality factors	Other factors
	River (raw water intake)	Turbidity, pH, Color, Water temperature	River level
	Water intake	Turbidity, pH, Color, Water temperature	Pumping discharge
Purification plant	Sedimentation tank	Turbidity, pH, Water temperature, Residual chlorine	Discharge, Pressure
	Filter		
	Water distribution network	Residual chlorine	Discharge, Pressure
	Sewage networks	BOD, COD (TOC), TN, TP, TSS	Discharge
Sewage treatment plant	Primary sedimentation tank	BOD, COD (TOC), TN, TP, TSS	Discharge
	Bioreactor		
	Rivers (discharge of treated sewage)	BOD, COD (TOC), TN, TP, TSS	Discharge

지 사이의 수위 차이를 이용하여 펌프의 용량에 비례하여 취수하도록 계산하였으며, 배수지는 직사각형의 배수지를 가정하고, 배수지는 상수관망의 배수관으로 나가는 유량과 취수장에서 유입되는 유량에 따라 수위가 변하도록 하였다.

개발된 모형은 사용자가 그래픽 인터페이스에서 모든 요소를 자유롭게 구성할 수 있게 하였다. Fig. 5는 하천 취수에서 물 사용을 마치고 처리된 물이 다시 하천으로 유입되기까지 모든 모듈을 구성하여 만들 도시 물 순환 모형의 예이다.

3. 적용 및 결과

3.1 도시 물 순환 통합모형 개발을 위한 모듈 결합

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이, 각 모듈별로 표출해야

하는 수질 및 유량 등 기타 인자들이 다르며, 각 인자는 계측 간격이나 표출되는 단위가 모두 다르다. 예를 들어, 하천수에서 정수장에 공급하는 원수를 취수하면 탁도, pH, 색도, 수온 등을 계측하지만, 정수가 마무리되어 물 사용자에게 공급될 때는 잔류염소농도가 매우 중요한 수질인자가 되며, 하수처리를 한 수 하천으로 방류할 때는 BOD, TN, TP, TSS 등과 같은 하수처리수 수질기준 항목들을 계측하고 만족하도록 방류해야 한다.

Figs. 6~7은 정수장과 하수처리장에서 계측되어 표시되는 수질인자 및 유량값을 나타낸다. 각 모듈별 계측값은 실시간 자동 계측이 원칙이지만, BOD와 같은 수질인자는 자동계측이 어려운 때도 있다.

그러므로 Fig. 8에 표시된 것과 같이, 정수장과 하수처리장은 1시간에 1번씩 유량 및 수질인자를 계측하는 것을 원칙으

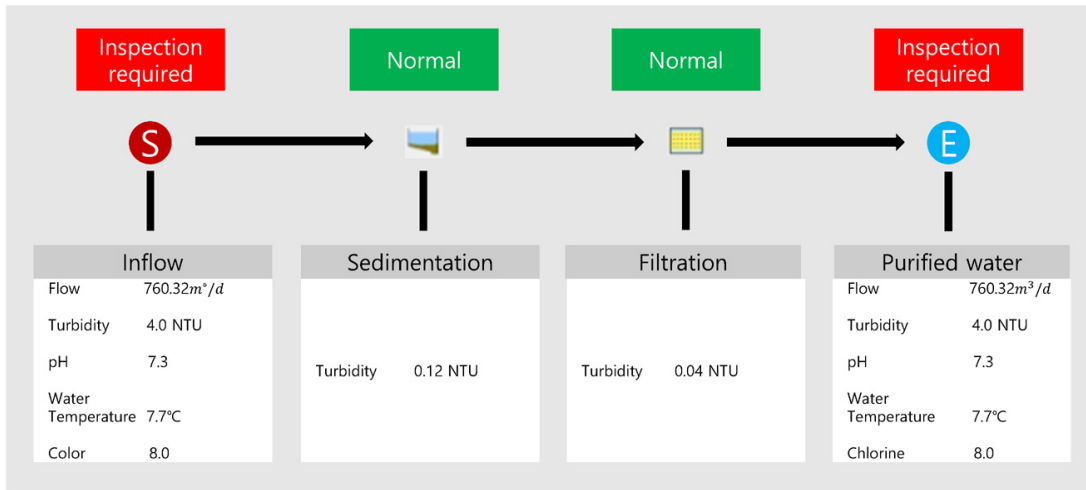


Fig. 6. Displayed Water Quality Factors in Water Purification Plant of Integrated Urban Water Cycle Model

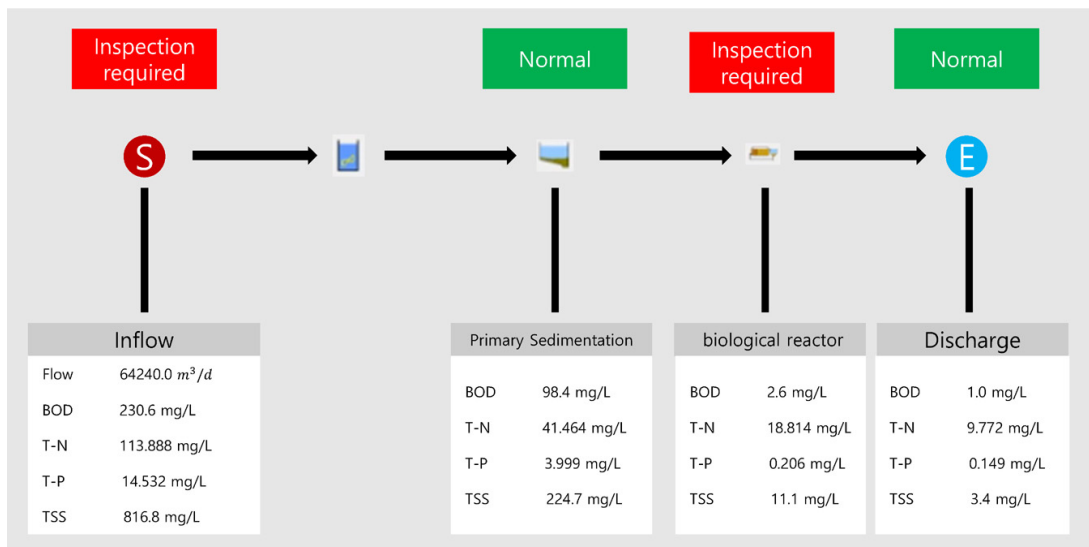


Fig. 7. Displayed Water Quality Factors in Sewage Treatment Plant of Integrated Urban Water Cycle Model

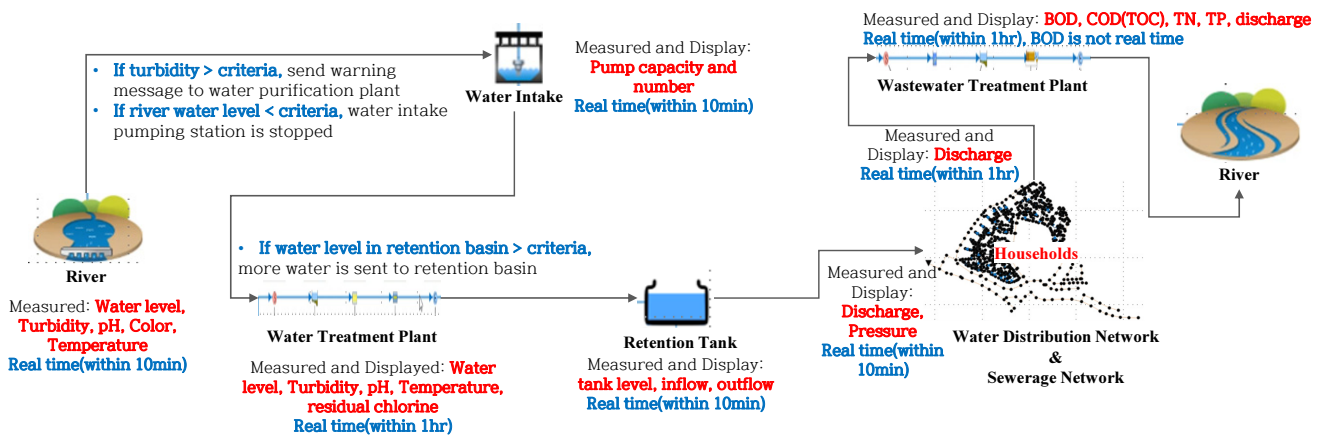


Fig. 8. Measured and Displayed Factors in Integrated Urban Water Cycle Model

로 하고, COD나 TOC를 포함한 수질인자들을 자동계측장비에 의해 계측한다. 이외의 하천, 취수펌프장, 배수지, 상수관망 및 하수관망의 유량 및 수질은 10분 이내 간격으로 실시간 계측이 원칙이다. 배수지나 상수관망의 경우에는 1분 간격으로 자동유량계측을 실시하는 것이 보통이므로, 도시 물순환 통합모형에서도 1분 단위 자료 표출을 시행한다. 배수지 수위 계산을 위해 1시간에 한 번씩 정수장에서 송수되는 유량을 누적하여 배수지의 수위는 Eqs. (1)-(3)과 같은 저류방정식으로 계산한다.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1)$$

$$S_t = S_{t-1} + \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \Delta t - \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \Delta t \quad (2)$$

$$H_t = \frac{S_t}{A} \quad (3)$$

여기서, S_t 는 t 시간의 배수지 저류량(m^3), I_t , O_t 는 t 시간 배수지로 유입되는 유입량 및 유출량(m^3/s), Δt 는 계측 시간 간격, A 는 배수지의 단면적(m^2), H_t 는 t 시간의 배수지 수위(m)를 나타낸다.

3.2 물사용량 및 배수지 수위 모의 결과

개발된 모형은 가상의 도시의 상수 및 오수 관망을 가정하여 물공급 상황을 모의하였다. Bowen et al. (1993)과 Heinrich (2007)이 미국 내 5개 도시의 물 사용량 패턴을 조사하여

제시한 주거 지역의 물 사용량 패턴(Fig. 9)을 이용하여 총 132개의 수용가 절점에 대한 물사용량을 모의 발생하였다(Fig. 10). Heinrich (2007)에 따르면, 주말과 주중의 물사용량 패턴이 다른 것으로 밝혀져 있으나, 평균값을 사용하여 절점별 100개의 시나리오를 모의 발생하였으며, 모의 발생한 결과 역시 오전과 오후에 침투사용량 값을 가지는 것으로 나타났다.

모의 발생한 물사용량에 따른 배수지의 수위 변화를 나타낸 그래프는 Fig. 11이다. 배수지에서는 수용가의 물사용량에 따라 충분한 물공급을 하기 위해 수위 변화가 발생한다. 수용가의 물사용량의 최댓값이 오전 5-8시 사이에 발생하므로, 해당 시간 배수지의 수위가 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 저녁 6-10시 사이에 발생하는 두 번째 최대사용량 공급을 위해 다시 한번 수위가 하강한다. 그러나 물사용량 변화에 비해 배수지 수위 변화는 크지 않은 것처럼 보일 수 있으며, 수위가 극단적으로 낮아지지 않도록 정수장에서 배수지로 물공급이 원활하게 이뤄지고 있음을 알 수 있다. 또한 배수지의 높이가 5 m (El. 310-315 m)이므로, 배수지의 최소 수위는 약 312 m, 최고 수위는 약 334.8 m로 배수지의 수위 변동폭이 배수지의 높이와 거의 같은 정도로 큰 것을 알 수 있다. 배수지의 수위가 낮아지면 정수장에서의 물공급량이 많아져야 하고, 이에 따라 취수펌프장의 취수량도 증가해야 한다.

또한 모의 발생으로 물사용량이 변화함에 따라 24시간 이후 Day2에서의 배수지 수위 변화의 변동폭이 Day1에 비해 증가하는 것을 볼 수 있다. 모든 물사용량 시나리오의 배수지 초기 수위가 같은 것을 고려하면 시간이 지날수록 변동폭과 불확실성이 증가한다는 것을 의미한다.

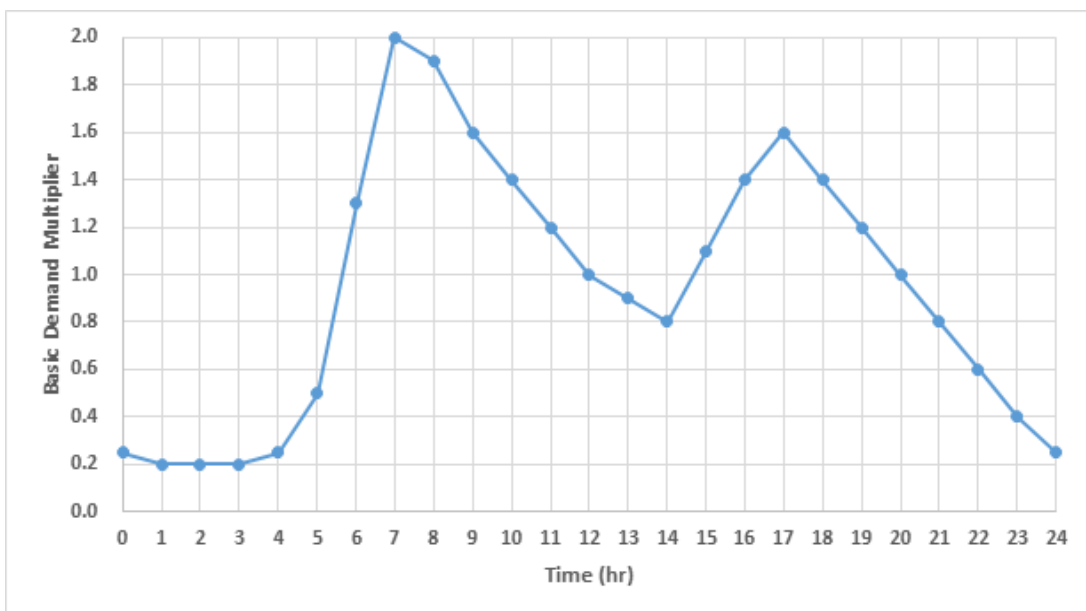


Fig. 9. Typical Diurnal Water Demand Pattern (Multiplier) Adapted from Bowen et al. (1993) and Heinrich (2007)

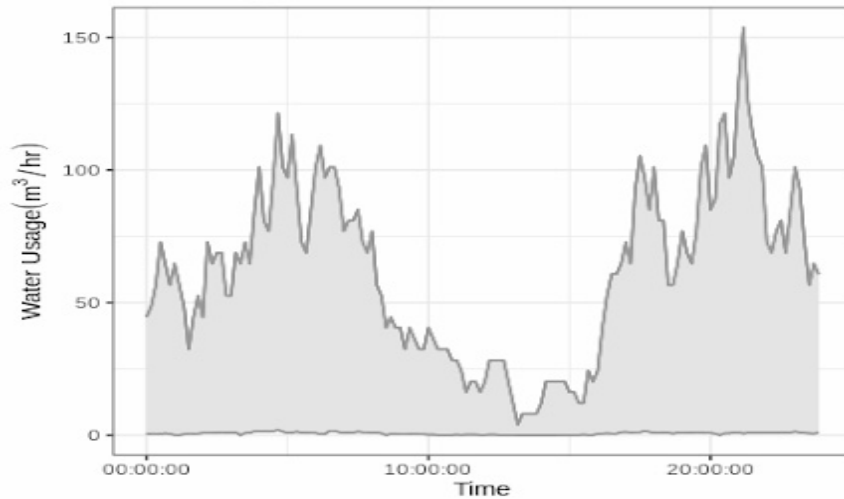


Fig. 10. Random Generation of Water Demand of Households in the Study Region

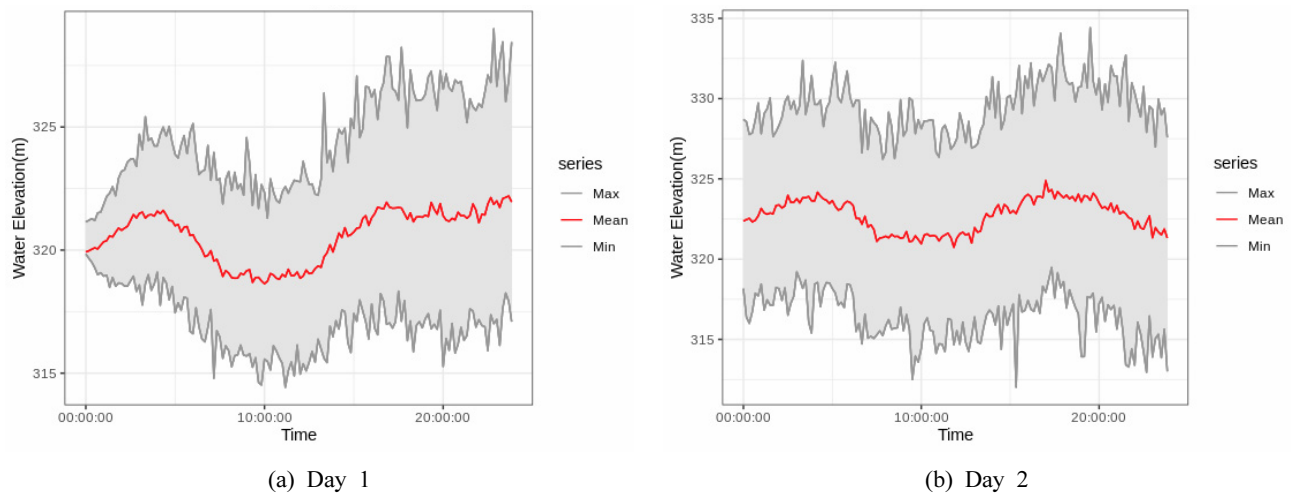


Fig. 11. Results of Water Levels in Retention Tank (m)

4. 결론

본 연구에서는 하천취수, 정수처리장, 배수지, 상수 및 우수관망, 하수처리장, 처리수의 하천방류를 연계한 도시 물 순환 통합모형을 구축하고, 가상의 물공급 시나리오를 이용하여 적용성을 판단하였다. 도시 물 순환 통합모형 구축을 위해 C++를 이용하여 자체적으로 개발된 취수펌프장 및 배수지 모의 모듈, 기존에 개발되어 상용 소프트웨어로 사용되고 있는 EPANET, SWMM, WaterFlow, MassFlow를 연계하였다. 각 모듈은 개별적으로도 모의할 수 있지만, 통합모형에서는 모듈 내 단위공정 운영 상태를 표시할 수 있도록 하였다. 예를 들어, 정수처리장 내 단위공정 별 수질 인자를 계측하여 표시하고 운전상태를 정상 및 점검필요 등으로 표시하도록 하였으며, 배수지로 유입되는 유량과 유출되는 유량 및 배수지 수위를 계측하여 표시하였다. 이를

통해 도시 물 순환 각 모듈의 운영 상태를 파악할 수 있다. 개발된 도시 물 순환 통합 모형은 수용가의 물 사용량이 증가하면 배수지에서 물공급이 많아지고, 이에 따라 취수펌프장의 취수량이 증가하여 정수처리장의 유량도 증가하도록 연계되었다. 단계별 유량 및 수질인자들을 계측하여 모형의 모듈에서 표현하도록 하였으며, 수질 및 수량에 문제가 감지되었을 때는 시스템에서 점검이나 오류 메시지가 표현되도록 하였다. 현재 개발된 모형은 개별 모듈의 운영이 별도의 프로그램이기 때문에 많은 양의 시나리오 자료를 빠르게 모의하는 것이 쉽지 않지만, 실시간 계측되는 값을 연계하고 모듈 별 모의 값을 표출하는 것은 빠르게 가능하다. 이 모형의 적용성을 검증하기 위해 모의 발생한 물 사용량을 적용하여 배수지의 수위 변화를 모의하였다. 배수지의 최대 및 최소 수위 범위 내에서 수위변화가 발생하며 변화되는 물 수요량을 안정적으로 공급하는 것을 알 수 있었다. 개발된

모형은 향후 에너지 사용량도 모의하고, 돌발적인 이상 상황에 대한 대처가 가능하도록 개량될 예정이며, 실무에서 스마트시티의 물공급이나 효율적인 도시 수자원 관리에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950002).

References

- Alvisi, S., Franchini, M., and Marinelli, A. (2007). A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 9, No. 1, pp. 39-50.
- Bowen, P.T., Harp, J.F., Baxter, J.W., and Shull, R.D. (1993). *Residential water use patterns*. Denver (CO), USA: American Water Works Association Research Foundation.
- Chung, G., and Ohk, W.S. (2020). Development of the urban water balance model by linking water distribution and sewer networks. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 369-377.
- Heinrich, M. (2007). *Water end use and efficiency project (WEEP) - Final report*. BRANZ Study report 159. Judgeford, New Zealand: BRANZ.
- Koo, J.Y., Yu, M.J., Kim, S.G., Shim, M.H., and Akira, K. (2005). Estimation of long-term water demand by principal component and cluster analysis and practical application. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 27, No. 8, pp. 870-876.
- Lee, D., Kim, J., and Kim, H. (2009). Statistical analysis on nonhousehold unit water use for business categories. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 4B, pp. 385-396.
- Ministry of Environment (ME). (2022). *Establishment of the first national waterworks master plan after unification of water management*. Retrieved October 21, 2022, from <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1552540&menuId=10525>
- National Waterworks Information System. (2021). Retrieved October 21, 2022, from <https://www.waternow.go.kr>

<i>Received</i>	November 14, 2022
<i>Revised</i>	November 14, 2022
<i>Accepted</i>	November 21, 2022