

# 상하수도 연계를 통한 도시 물 순환 모형 개발 및 적용 Development of the Urban Water Balance Model by Linking Water Distribution and Sewer Networks

정건희\* · 옥원수\*\*

Chung, Gunhui\*, and Ohk, Won Soo\*\*

## Abstract

Due to urban overcrowding, the population density of residential areas and water use per unit are increasing. Therefore, it is necessary to study the flow of water supplied to cities and to improve the healthy circulation of urban water. This study used Modelica, a non-causal analytical program. Using Open Modelica, the researchers constructed a model linking water distribution and sewerage, as the basis of a balanced urban water model. Using the programmer's toolkit provided by EPA-NET and EPA-SWMM, which are commonly used to simulate the existing water supply and sewage pipe networks, Open Modelica-based water distribution networks and sewage pipe networks can be connected and simulated based on the customer block. A model was built so that 90% of the hourly water consumption supplied to the water supply pipe network can be automatically introduced into the sewage pipe network. If a matching table is constructed to connect the nodes of the water supply pipe network and the sewer pipe network, the nodes will reflect in the graphical user interface (GUI) developed in Open Modelica. It was developed to enable modification of links, pumps, tanks, and valves. The 48-hour water supply was simulated using the developed model, and it was confirmed that water supply and sewage networks were successfully connected. In the future, we plan to develop a more expanded and realistic urban water circulation model by considering additional urban water circulation factors, such as sewage treatment, water reuse, rainwater use, storm runoff, and low-impact development facilities. Through this study, it was confirmed that Modelica can simulate changes in the system over time. Since it is a formula-based non-causal simulation language, it is possible to establish and reuse relationships between blocks through block-by-block development of urban water circulation elements. It is expected to contribute to the visualization and concretization of future urban water circulation models.

**Key words :** Urban Water Balance Healthiness, Urban Water Balance Model, Linkage of Water Distribution and Sewer Networks, Open Modelica

## 요 지

도시 과밀화에 따라 주거지역의 인구밀도가 높아지고, 단위 면적당 물 사용량이 증가하고 있다. 그러므로 도시에 공급된 물의 흐름을 연구하고, 도시 물 순환 건전성 제고를 위한 노력을 해야 한다. 본 연구에서는 비인과적인 프로그래밍인 Modelica를 소개하고, Open Modelica를 이용하여 도시 물 순환 모형의 기본이 될 수 있는 상수도과 하수도를 연계하는 모형을 구축하였다. 기존에 상수관망과 하수관망을 모의하기 위해 일반적으로 사용되는 EPA-NET과 EPA-SWMM에서 제공하는 개발자 toolkit을 이용하여 수용가 블록을 기준으로 Open Modelica 기반 상수관망과 하수관망을 연계하여 모의할 수 있도록 하였다. 상수관망에 공급되는 시간별 물 사용량의 90%가 하수관망으로 자동 유입될 수 있도록 모형을 구축하였으며, 상수관망과 하수관망의 절점 간 연결을 위해 매칭테이블을 구축하면 Open Modelica에 개발된 GUI에서 절점, 링크, 펌프, 탱크, 밸브 등의 수정이 가능하도록 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 48시간 물 공급을 모의하였으며, 성공적으로 상수와 하수가 연계되어 모의되는 것을 확인하였다. 향후 개발된 모형을 기본으로 하수처리수 재이용, 빗물이용, 우수의 유출 흐름, 저영향개발 시설 등과 같은 도시물순환 요소를 추가적으로 고려하여 보다 확장되고 실제에 가까운 도시 물 순환 모형을 개발할 계획이다. 본 연구를 통해 Modelica가 시간에 따른 시스템 내 변화를 모의할 수 있다는 것을 확인하였으며, 수식기반의 비인과적 시뮬레이션 언어이므로 도시 물 순환 요소의 블록별 개발을 통해 블록 간 관계 설정 및 재사용 등이 가능하므로, 향후 도시 물 순환 모형의 시각화 및 구체화에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

**핵심용어 :** 도시 물순환 건전성, 도시 물순환 모형, 상하수도 관망 연계, 오픈 모델리카

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

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

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

CEO, Geonsoft Co.

## 1. 서론

도시의 물 문제는 수량과 수질 2가지의 관점에서 접근할 수 있다. 우선 수량의 관점에서 살펴보면, 도시는 일반적으로 불투수면이 넓어 자연유역에 비해 침투량이 작고, 이로 인해 도시 개발 후 장시간이 지나면 지하수 및 도시 하천수의 부족이 발생하는 경우가 많다. 또한, 강우 시 불투수면을 흘러 빠르게 발생하는 침투 유출로 인해 하류에 홍수 피해를 야기하기도 한다. 그러므로 도시 수자원의 수량 관리를 위해 강우 시 침투량을 증가시키기 위한 방법으로 저영향개발(Low Impact Development, LID) 시설을 설치하는 등의 노력을 기울이고 있다(Kim et al., 2014; Yeon et al., 2014; Lee et al., 2015).

도시 내 수량 문제는 비단 강우에 기인하는 수자원의 효과적인 유역 내 저류량 증가에만 국한된 것은 아니다. 도시의 과밀화 및 삶의 질 향상으로 인해 도시의 1인당 물 사용량이 증가하고 있으며, 도시 전체의 상수도 사용량도 매년 증가하고 있다(ME, 2019). 그러므로 도시 전체에서 사용하는 생활용수의 절대량이 증가하였고, 하수처리장을 통해 하천으로 방류되어 사라지고 있다. 그러므로 도시에서 사용하는 물을 효율적으로 관리하기 위해 우수율(정수장에서 생산하여 공급된 수도물의 총 수량 중에서 요금수입으로 받아들여진 수량의 비율)을 높여려는 노력이 지속되고 있으며, 사용하고 난 생활하수를 재이용하려는 노력도 함께 기울이고 있다.

도시 물 문제 중 수질과 관련된 문제 역시 도시 내 초기 강우 유출수에 의한 수질 오염, 하천수 및 지하수량 저감으로 인한 수질 문제 등 다양한 관점의 접근이 필요한 문제이다. 이러한 수질 문제 해결을 위해 역시 LID 시설의 효과 연구 등 다양한 연구들이 수행되었다(Guo and Urbonas, 1996; Choi et al., 2011).

그러므로 도시의 물 순환에 대한 연구는 강우에 기인하는 물의 유역 내 저류량 확보뿐만 아니라 유역 내에서 사용되는 물을 모니터링하고 정원용수 등으로 재이용함으로써 궁극적으로 강우에 기인하는 물 사용량을 줄이고, 유역 내에서 발생하는 오염물질을 저감하는 등 매우 광범위하고 폭넓은 접근이 필요하다. 이를 위해 도시 수자원의 흐름을 이해하고 모의할 수 있는 통합 모형의 구축은 미래 도시 수자원 관리에 매우 중요한 첫 걸음이 될 것이다. 통합 도시 수자원 관리 모형은 궁극적으로 우수, 상수, 하수 등 모든 형태의 물 관련 모니터링과 모의가 가능한 형태가 되어야하며, 정수처리시설과 하수처리시설 등 수질과 물 재이용 관련 모의가 가능한 시설도 포함된 진정한 의미의 통합 모형이어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 도시 수자원 통합 모형의 첫 걸음으로 수용가를 중심의 상수도과 하수도 관망을 연계 모의하는 도시 물 순환 모형을 구축하고 그 성능을 확인하였다. 수용가 중심으로 상수도과 하수도 관망을 연계하여 도심

지의 물 순환을 모의하여 그 정보를 계측하고, 평상시 물 사용량 관리 및 단수나 수질 문제 발생 등 비상상황 발생 시 물공급 관련 정책 결정에 활용하는 것을 목적으로 한다. 상수도과 하수도 관망 분석을 위해 자주 사용되는 EPA-NET 과 EPA-SWMM모형을 Open-Medlica에서 연계 모의할 수 있는 플랫폼을 구축하여 사용자의 편의성을 높였으며, 사용자 그래픽 환경을 구성하여 두 가지의 관망을 통합하여 운영할 수 있는 환경을 구축하였다.

## 2. 상·하수도 흐름 모의 모형

### 2.1 상수도 공급 모형

EPA-NET 모형은 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)의 Drinking Water Research Division에서 개발된 모형으로, 폐쇄형 관로의 수리 및 수질 분포를 해석하기 위한 컴퓨터 프로그램이다. EPA-NET 모형은 관망의 관로, 절점(Node), 펌프 밸브, 저장 탱크 또는 배수지로 구성되며, 관망의 물리적 특성인 관경, 길이, 조도계수, 에너지 수두 변화량 등을 이용하여 관망의 지점별, 모의 시간별로 수리학적 특성인 유량, 유속, 수압, 손실수두와 관망에서의 수질변화를 모의한다. 관망 내 흐름에 의한 손실수두는 Eq. (1)에 제시된 일반식에 의해 계산되며, Table 1에 표시된 바와 같이 유량지수  $b$ 에 따라 Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy, Manning 식 등으로 구분되어 적용된다. 일반적으로 상수도 관망과 같은 압력관의 손실수두 계산에는 Hazen-Williams 식을 많이 적용하며, Darcy-Weisbach 식은 물 이외 다른 유체 흐름에 자주 적용된다. Chezy, Manning 식은 압력관이 아닌 개수로 흐름에 일반적으로 많이 사용되는 식이다. 수질 모델은 수체(Bulk Flow)상의 반응, 관벽(Pipe Wall)에서의 반응, 관벽(Pipe Wall)과 수체(Bulk Flow)간의 질량 전달로 구성되며, 수리조건을 토대로 하여 관망에서의 수질변화를 모의한다.

$$h_L = a \cdot q^b \quad (1)$$

여기서,  $h_L$  : 손실수두(m),  $q$  : 유량( $m^3/sec$ ),  $a$  : 저항계수,  $b$  : 유량지수를 나타낸다.

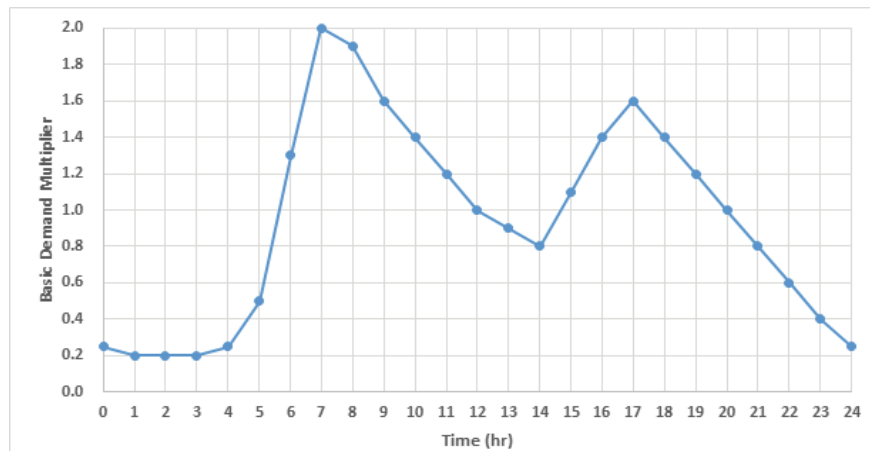
EPA-NET을 이용하여 상수도과 같은 압력관의 흐름을 모의할 경우에는 각 수용가의 시간별 수요량이 공급 가능 한지를 평가하고, 적정 압력을 유지하기 위해 모형을 적용한다. 각 수용가의 시간별 사용량은 기본 사용량과 시간별 사용량 패턴을 적용하여 모의하는 경우가 많다.

시간별 물 사용량 패턴에 관한 연구가 다양하게 존재하지만, Bowen et al. (1993)은 미국 내 5개 도시의 물 사용량 패턴을 조사하여 주거 지역의 물 사용량 패턴을 제시하였으며, Heinrich (2007)도 여름과 겨울철로 구분하여 주거지역의

**Table 1.** Head Loss Equations Applied in EPA-NET

Formula	a	b
Hazen-Williams	$4.75 \cdot C^{-1.85} \cdot d^{-4.87} \cdot L$	1.85
Darcy-Weisbach	$0.0252 \cdot f(\varepsilon, d, q) d^{-5} \cdot L$	2
Chezy-Manning	$4.66n^2 \cdot d^{-5.33} \cdot L$	2

\* C : Hazen-Williams coefficient,  $\varepsilon$  : Absolute roughness in Darcy-Weisbach equation factor, f : Darcy-Weisbach friction factor, n : Manning's roughness coefficient, d : Pipe diameter (m), L : pipe length (m)



**Fig. 1.** Typical Diurnal Water Demand Pattern (Multiplier) Adapted from Bowen et al. (1993) and Heinrich (2007)

물 사용량 패턴을 제시한 바 있다. 모두 Fig. 1에 나타난 바와 같이 아침 출근시간에 가장 큰 첨두 수요량이 발생하고 저녁시간과 퇴근시간에 두 번째 첨두 수요량이 발생한다고 알려져 있다.

## 2.2 하수도 처리 모형

EPA-SWMM은 1971년 미국 EPA의 지원을 받아 만들어진 도시 유역에서의 유출수 및 수질을 모의하기 위한 모형이다. 모형에서는 우수관의 월류, 우수관 내 흐름, 관 내 압력이 작용할 때의 모의(Surcharge) 등이 가능하며, 수리학적 영향에 고려할 수 있다. 또한 유역 내 존재하는 저류 시설 및 수리 구조물에 대한 영향을 평가할 수 있다. 도시 유역에서의 유출을 모의하기 위해 모형은 소배수구역(Subbasin)과 관로를 이용한다. 소배수구역에 내린 강우 및 용설이 유역의 입력자료가 되고, 유역의 표면 흐름과 유역 내 관로를 따라 유출이 발생한다. 유출 계산 시 증발과 침투, 지면저류 등의 손실을 고려하며 오염도 역시 모의가 가능하다.

Table 2에 EPA-SWMM에서 사용되는 흐름 해석 방법의 특성을 정리하였다. 관로 내 흐름 해석을 위해 연속방정식과 St. Venant 식이라고 알려진 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용한다. Table 2에 명시된 바와 같이 St. Venant 식 전체를 생략 없이 그대로 적용하는 경우를 Dynamic wave analysis라고 하는데, 가장 이론적으로 정확한 해를 제공한

다. Dynamic wave analysis 분석은 수로의 저류량, Backwater 효과, 유출구와 유입구 손실, Culvert 흐름, 역류, 압력 흐름 등을 모의할 수 있다. 그러므로 루프나 Backwater가 존재하는 유역, 위어나 오리피스에 의해 흐름이 방해받는 유역에서는 유용한 해법이 된다. 두 번째로 Kinematic wave analysis는 연속방정식과 St. Venant 식의 Inertial과 Pressure force 항이 생략된 운동량 방정식을 적용하여 근사해를 찾는다. 그러므로 Backwater 효과, 유입구와 유출구 손실, 역류, 압력 흐름 등은 계산이 불가능하다. 이 방법은 관이 급경사(>0.1%)이며 관 내 수심이 얇고 유속이 빠른 유역에 적용하는 것이 바람직하다고 알려져 있다.

Dynamic wave analysis에 적용되는 지배방정식은 연속방정식과 St. Venant 식으로 알려진 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 거리(m),  $t$ 는 시간(sec),  $A$ 는 흐름 단면적( $m^2$ ),  $Q$ 는 유량( $m^3/s$ ),  $H$ 는 수로의 표고이며, 어떤 기준면에서 하상까지의 표고  $Z$ 와 수심  $y$ 의 합이다.  $S_f$ 는 에너지선의

**Table 2.** Features and Limitations of Dynamic Wave and Kinematic Wave Solutions

Feature	Dynamic Wave	Kinematic Wave
Network topology	branched and looped	branched only
Flow splits	yes	with flow divider nodes
Adverse slopes	yes	no
Invert offsets	yes	ignored
Pumping	yes	only from storage nodes
Weirs and orifices	yes	only from storage nodes
Ponded overflows	yes	yes
Lateral seepage	yes	yes
Evaporation	yes	yes
Minor losses	yes	yes
Culvert analysis	yes	yes
Hydrograph attenuation	yes	yes
Backwater effects	yes	yes
Surcharge/Pressurization	yes	yes
Reverse flow	yes	yes
Tidal effects	yes	yes

경사,  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ )이다.

St. Venant 식은 Henderson (1966), Cunge et al. (1980), French (1985)에 유도되어 있으며, 다음 4가지의 가정을 가진다. (1) 1차원 흐름, (2) 압력은 정수압이며, (3) 수로 바닥의 경사가 작아서 cosine 값이 거의 1에 가까우며, (4) 경계조건은 정상류와 같이 설정한다.

Kinematic wave analysis의 지배방정식으로 사용되는 연속방정식과 운동량 방정식은 Dynamic wave analysis에 적용되는 운동량 방정식에  $S_0 = S_f$ , 즉 수로 바닥의 경사와 에너지선의 경사가 같다는 가정을 도입하여 Inertial과 Pressure force 항의 영향을 무시한 식을 적용한다. 그 결과 적용되는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

수용가에서 사용하고 난 상수는 다시 하수도를 통해 하수처리장으로 흘러 들어간다. 하수도는 수용가에서 사용하고 난 하수만 흘러가는 ‘분류식’ 하수관과 우수가 함께 흘러 하수처리장으로 흘러들어가는 ‘합류식’ 하수관으로 구분할 수 있다. 합류식 하수관은 강수가 노면에 떨어져 주택이나 농경지, 도로 등에서 오염물질과 섞여 수용가에서 배출되는 오수와 함께 하수처리장으로 유입된다. 그러나 강우 시에는 합류식 하수관의 용량이 초과되어 하수처리장에서 처리하지 못하는 오수와 우수가 하천으로 처리되지 않고 유입되는 단점이 있다. 도시 인구 밀집도가 높아질수록 하수처리장에

서 처리되지 않고 방류되는 오수의 농도가 높아져 강우 시 하천 오염을 야기할 수 있다. 그러므로 최근에는 분류식 하수관을 건설하고 오수만을 하수처리장으로 보내는 용도로 사용하고 있다. 서울시의 하수도 통계에 따르면, 2018년 서울시 전체 하수관 길이 10,728 km 중 약 89%인 9,545 km가 분류식 하수관이었다.

### 3. 오픈 모델리카를 이용한 상하수도 모의 연계

오픈 모델리카는 모델리카 기반의 모델링과 시뮬레이션 모형으로 복잡한 시스템의 컴포넌트 지향 모델링을 위한 객체 지향, 선언적, 다중 도메인 모델링 언어이다. 오픈 소스 기반의 모형으로 자유롭게 사용할 수 있는 시스템 다이내믹 라이브러리 존재하여 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있다.

다양한 공학 분야에서 활용이 가능하며, 시간에 따라 변하는 동적인 시스템이라면 자연적인 것이든 인공적인 것이든 시뮬레이션이 가능하다. 과거 특정 공학 분야의 전문화된 프로그램을 사용하여 모형을 구축하고 시뮬레이션 하는 것과 달리 모델리카는 기계, 유압, 전기, 열 등 여러 개의 물리 영역을 포함하는 복잡한 시스템을 다중 도메인으로 구성하여 통합적으로 모의한다.

모델리카 언어의 가장 큰 특징은 일반적인 언어와 달리 비인과적 프로그래밍(Acausal programming) 방식을 사용한다는 것이다. 일반적인 프로그래밍 언어는 처음부터 마지막까지 순차적으로 과정이 진행되는 인과적 프로그래밍(Causal programming)을 따르므로 Fig. 2(a)에 표시된 바와 같이 수정을 위해서는 모든 단계를 수정해야 하고, 특정 단계를 수정한 결과는 그 다음 단계에만 영향을 미치지만,

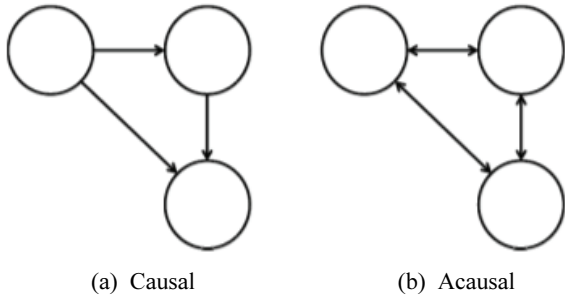


Fig. 2. Causal and Acausal Approach

Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이, 비인과적 프로그래밍 방식은 중간 단계의 하나를 변경하면 이와 상관이 있는 전과 후의 모든 단계에 영향을 미치며 보다 실제적으로 그 영향을 모의할 수 있다.

모델리카는 대입문(Assignment Statement)을 사용하지 않고 방정식을 사용하여 비인과적인 방식으로 모형을 구축한다. 전기, 열, 유체 등 다양한 분야의 물리적인 기본 컴포넌트들을 서로 연결하여 일반적인 객체와 상속의 개념을 구현하는 객체지향 언어이다. 그러므로 부품을 재사용할 수 있고 모형의 성능을 지속적으로 개선할 수 있다. Fig. 3은 오픈 모델리카의 사용자 인터페이스를 보여주고 있다.

## 4. 적용 및 결과

### 4.1 대상 지역

도시 물 순환 모형 구축을 위해 상수관망과 오수관망을 적용한 대상지를 선정했다. 대상지는 세종시에 새로 개발된 지역 중 한 곳으로 아파트 단지와 유치원, 초·중·고등학교,

공원이 위치한 지역이다. 대상 지역 내에 위치한 아파트는 총 2개 단지이며, 각 단지의 세대수는 1,990세대와 1,110세대이다. 각 동별 세대수를 조사하여 동별 물 사용량을 계산할 수 있도록 하였다. 수용가에 상수가 생활용수로 공급되면, 사용하고 난 후 하수도를 통해 하수를 배출하는데 공급된 물의 약 90%가 하수로 공급된다고 알려져 있다. 이를 삭감률이라 하고, 본 연구에서도 상수와 하수의 삭감률을 90%로 적용하였다.

대상지역에 상수관망과 하수관망을 그린 관망도를 Fig. 4에 나타내었다. 대상지역이 크지 않으므로 상수와 하수관망이 복잡하지 않으나, 망형을 이루고 있는 상수관망(Fig. 4(a))과 달리 수지상형의 하수관(Fig. 4(b))을 볼 수 있다. 상수관망은 절점 32개, 관은 31개로 구성되어 있으며, 배수지나 광역 상수도를 통해 공급되는 소배수구역을 나타내고 있으므로, 공급되는 압력을 현실과 맞추기 위해 임의로 tank를 추가하여 모의하였다.

Fig. 4(b)에 나타난 하수관망은 15개 소유역으로 구분하여 각 소유역에 해당된 상수관 급수관에서의 물 사용량 중 90%가 해당 구역의 유입량이 되도록 구성하였다. EPA-SWMM 모형의 입력자료는 시간별 상수 공급량에 삭감률을 고려하여 시간별 하수 발생량을 입력해야 한다. 이 시간별 하수 발생량을 입력할 수 있는 방법은 크게 소유역의 강우로 입력하거나 소유역 절점의 유입량으로 입력하는 방법으로 구분할 수 있다. 이 중 첫 번째 방법인 소유역의 강우시계열로 입력한다면, 지표면 흐름 등 다양한 수문학적 과정을 모두 고려하게 되므로, 사용 후 바로 하수관을 통해 흘러가는 실제 오수 흐름과 다른 양상으로 유입 된다. 그러므로 두 번째 방법인 하수관의 절점에 시간별 하수 유입량을

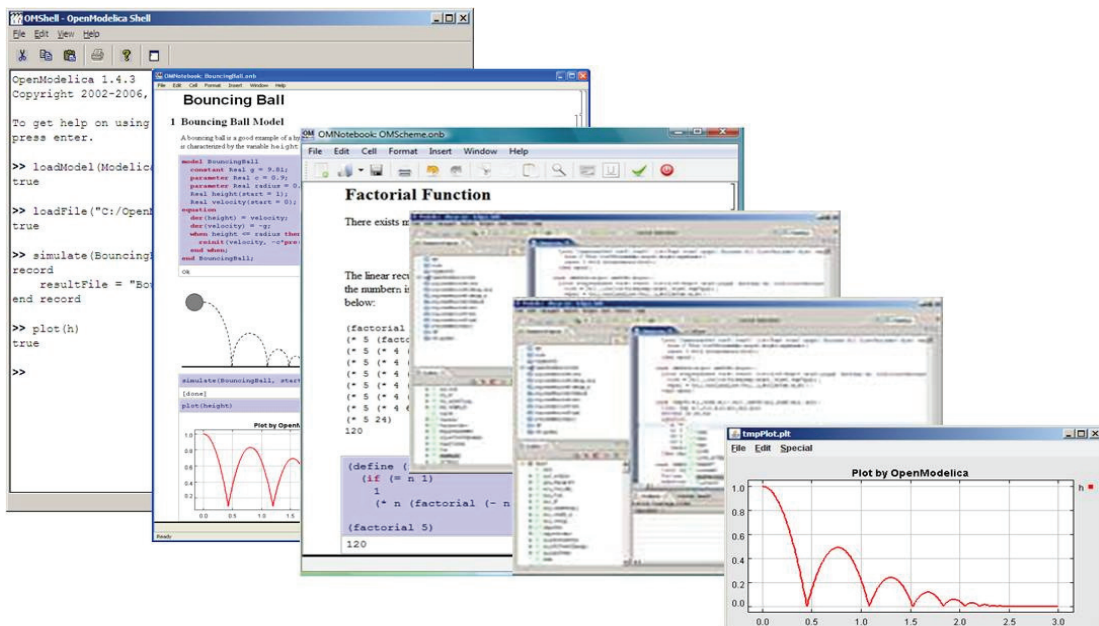
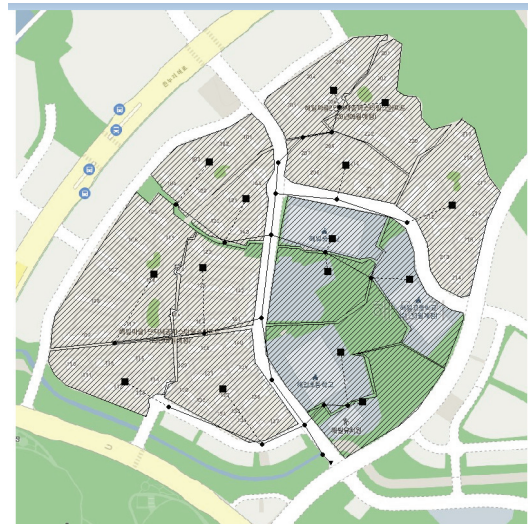


Fig. 3. User Interface of Open Modelica





(a) Water distribution network (EPA-NET)



(b) Sewer network (EPA-SWMM)

Fig. 4. Water Distribution and Sewer Networks in the Study Area

Table 3. Matching Table between Water Distribution and Sewer Networks with Target Population and Base Water Demand

Junction no. of Water Distribution Network	Junction no. of Sewer Network	No. of Households	Target Population	Base Water Demand (l/min)
30	18	275	660	159.50
25	45	204	489.6	118.32
31	2	580	1,392	336.40
29	28	400	960	232.00
32	27	172	412.8	99.76
28	47	359	861.6	208.22
23	43	353	847.2	204.74
19	44	216	518.4	125.28
24	1	311	746.4	180.38
22	31	230	552	133.40
14	45	middle school	600	145.00
26	40	high school	300	72.50
21	13	park	150	36.25
27	24	elementary school	1,050	253.75
11	46	kindergarten	160	38.67

입력하는 방법을 적용하였다.

상수관망(EPA-NET)의 급수가 이루어지는 절점과 하수관(EPA-SWMM)에서 사용하고 난 물을 받는 절점을 매칭하고 각 절점에 급수되는 물 사용량(Base water demand)을 Table 2에 나타내었다. 급수 구역 중 아파트가 아닌 유치원, 초·중·고등학교, 공원의 물 사용량은 학교의 학생 정원을 기준으로 계산하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 각 아파트의 동별 세대수를 조사하고, 세대수를 기반으로 물 사용량을 추정하였다. 통계청에서 작성한 2019년 통계에 따르면, 우리나라의 1가구당

평균 인구수는 2.4명으로 제시되어 있다. 그러므로 각 동별 세대수를 고려한 각 동별 인구수를 계산할 수 있다. 그 결과를 이용하여 아파트의 각 동별 물 사용량을 추정할 수 있다. 환경부에서 매년 발행하는 「상수도 통계」에 따르면, 1인당 물 사용량은 348 l/day/p으로 알려져 있다. 그러므로 각 구역에 공급되는 기본 물 사용량(Base water demand)은 Table 3과 같다.

Table 3에 제시된 상수관망과 하수관망의 매칭 정보를 활용하여 지도 위에 대략적으로 나타내면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.



Fig. 5. Mapping of Water Distribution and Sever Networks in the Study Area

#### 4.2 EPA-NET과 EPA-SWMM 연계를 통한 도시 물 순환 모형 개발

앞에서 설명한 오픈 모델리카 언어를 사용하여 EAP-NET을 기반으로 구축한 상수관망과 EPA-SWMM 모형을 기반으로 구축한 하수관망을 연계하여 모의할 수 있도록 새로운 도시 물순환 모형을 개발하였다.

미국 환경청(EPA)에서 개발하여 배포하는 EPA-NET과

EPA-SWMM 모형은 모두 오픈 소스에서 개발이 가능하도록 개발자 toolkit을 함께 배포하고 있으므로, 오픈 모델리카에서 두 프로그램의 개발자 toolkit을 이용하여 연계를 하였다. EPA-NET의 컴포넌트를 변환하기 위해 C++ 언어를 사용하였고, EPA-SWMM의 컴포넌트를 모델리카 형식으로 변환하기 위해 Delphi 10.4를 이용하여 변환 라이브러리를 개발하였다. Epanet과 SWMM 시뮬레이션 결과를 오픈 모델리카 GUI 인터페이스에 적용하기 위해 Visual Studion 2019에서 C++를 이용하여 dll를 개발하였다. Fig. 6에 나타난 사용자 화면(GUI)과 같이 EPA-NET과 EPA-SWMM에서 네트워크를 구성할 때 사용할 수 있는 절점, 링크, 탱크, 밸브, 펌프 등의 아이콘을 동일하게 개발하여 위쪽 toolbar와 왼쪽 탐색창에서 볼 수 있도록 추가하였으며, 개발된 오픈 모델리카 GUI에서 연계된 모형을 직접 모의하고 결과를 볼 수 있도록 하였다.

개발된 모형의 성능 평가를 위해 특정 48시간 동안의 물 공급과 물 순환을 모의하였다. 기본 물 사용량은 Table 3과 같이 구역별로 지정하였으며, Fig. 1에 제시된 1일 시간별 물 사용량 변화 패턴을 적용하여 2일 동안 물 공급을 모의하였다.

모의 결과, Fig. 7과 같은 48시간 동안의 물 사용량과 하수 발생량을 관측할 수 있었다. 물 사용량은 EPA-NET에 입력되어 있는 기본 물 사용량과 물 사용량 패턴에 의해 생성이 되고, 하수 발생량은 삭감률을 고려하여 매 시간 자동 계산된다. Table 3에 제시된 모든 절점에서 같은 계산이 수행되지만, 대표적으로 상수관망 절점 29와 하수관망 절점 28이 연계되는 지점에 대해서만 그래프를 제시하였다.

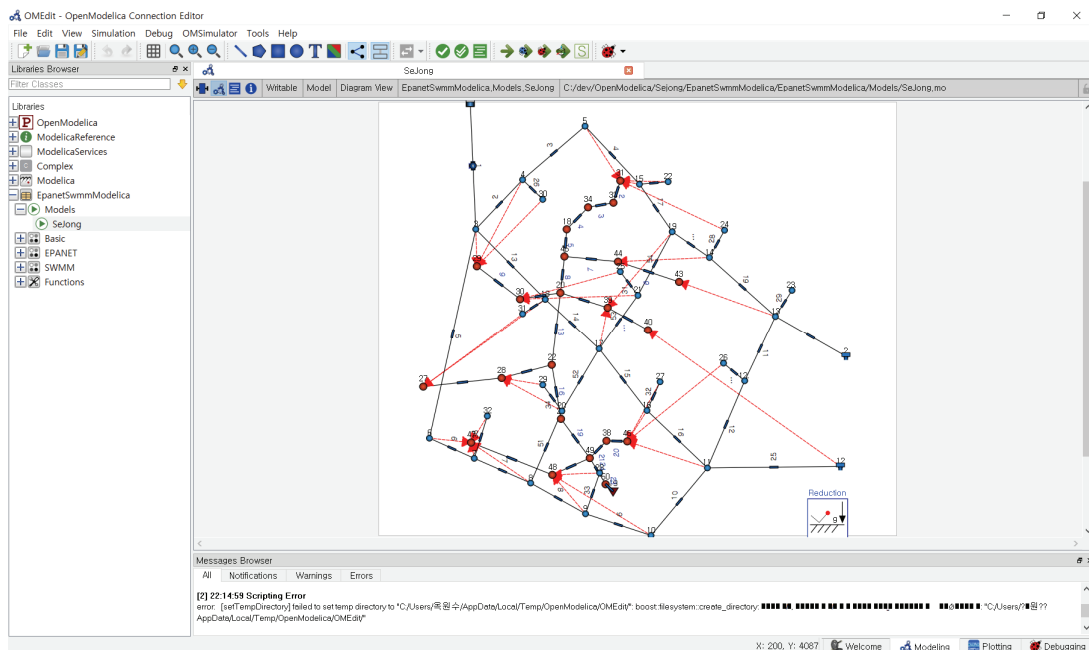


Fig. 6. GUI of the Developed Urban Water Balance Model for Mapping of Water Distribution and Sever Networks in the Study Area (Open-Modelica Environment)

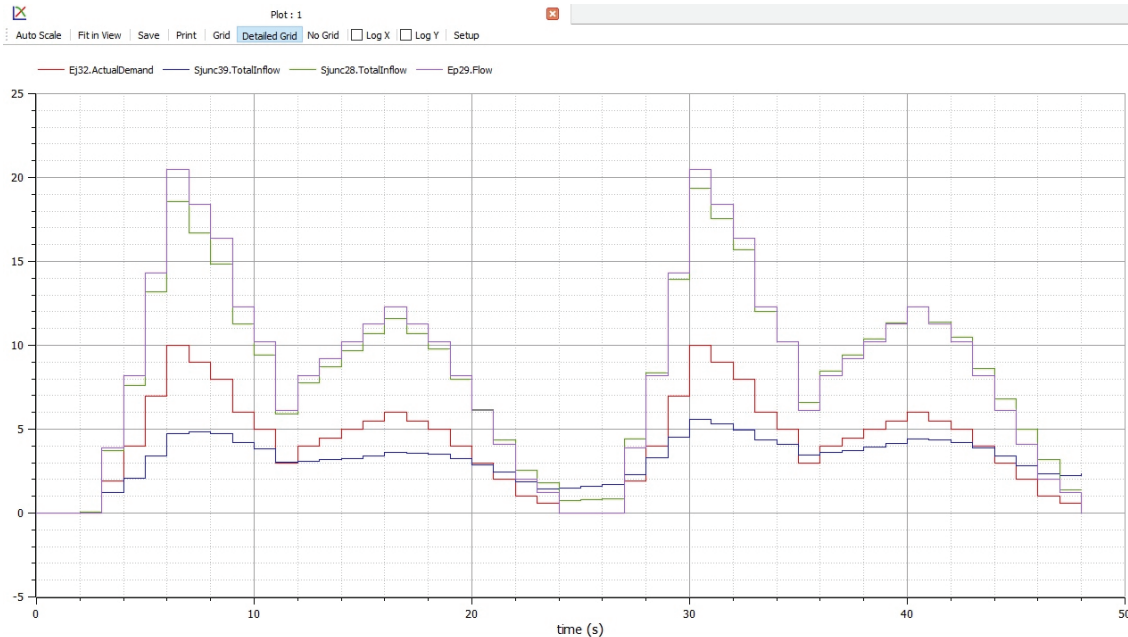


Fig. 7. Water Demand in Node 29 (EPA-NET) and Sanitary Sewers in Node 28 (EPA-SWMM) during 48 hrs Modeling Period in Open Modelica

## 5. 결론

본 연구에서는 비인과적 프로그래밍인 모델리카에 대해 소개하고, 오픈 모델리카를 이용하여 상수도과 하수도를 연결한 도시 물 순환 모형을 구축하였다. 이는 궁극적으로 추구하는 통합 도시 물 순환 모형의 첫 걸음으로, 강우에 기인하여 도시 내 저류나 침투를 통해 유역 보유량을 증가시키는 수자원과 도시 내 생활용수 흐름, 수처리 시설을 모두 연결하는 모형의 일부이다. 이 중 도시에서 가장 상시적인 흐름인 상수와 하수 흐름을 연계하여 실제 도시민들의 주거 공간을 중심으로 발생하는 물 순환을 모의하기 위한 모형을 구축하였다. 기존에 상수관망과 하수관망을 모의하기 위해 일반적으로 사용되는 EPA-NET과 EPA-SWMM에서 제공하는 개발자 toolkit을 이용하여 오픈 모델리카 기반 상수관망과 하수관망을 연계하여 모의할 수 있도록 하였다. 상수관망에 공급되는 시간별 물 사용량의 90%가 하수관망으로 자동 유입될 수 있도록 모형을 구축하였으며, 상수관망과 하수관망의 절점 간 연결을 위해 매칭테이블을 구축하면 오픈 모델리카에 개발된 GUI에서 절점, 링크, 펌프, 탱크, 밸브 등의 수정이 가능하도록 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 48시간 물 공급을 모의하였으며, 성공적으로 상수와 하수가 연계되어 모의되는 것을 확인하였다. 향후 개발될 통합 도시 물 순환 모형은 하수처리수 재이용, 빗물이용, 우수의 유출 흐름, 저영향개발 시설 등과 같은 도시 내 추가적인 물 순환 요소를 고려하여, 보다 확장되고 실제에 가까운 도시 물 순환 모형이 될 것이다. 본 연구를 통해 모델리카가 시간에 따른 시스템 내 변화를 모의할 수 있다는 것을 확인하

였으며, 수식기반의 비인과적 시뮬레이션 언어이므로 도시 물 순환 요소의 블록별 개발을 통해 블록 간 관계 설정 및 재사용 등이 가능하므로, 향후 도시 물 순환 모형의 시각화 및 구체화에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

## 감사의 글

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

## References

- 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.
- Choi, C.H., Choi, D.G., Lee, J.K., and Kim, S. (2011). An hybrid approach for designing detention and infiltration-based retentions to promote sound urban hydrologic cycle. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-8.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. London, UK: Pitman.
- French, R.H. (1985). *Open-channel hydraulics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.



- Guo, J.C.Y., and Urbonas. R.B. (1996). Maximized detention volume determined by runoff capture ratio. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 1, pp. 33-39.
- Heinrich, M. (2007). *Water end use and efficiency project (WEEP) - Final report*. BRANZ Study Report 159, BRANZ, Judgeford, New Zealand.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. New York, NY, USA: MacMillan Publishing.
- Kim, E.S., Yeon, J.S., Shin, H.S., Lee, J.S., and Choi, H.I. (2014). Study on stormwater runoff reduction effects by LID application areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 2, pp. 309-316. doi: 10.9798/KOSHAM.2014.14.2.309
- Lee, J., Lee, Y., Choi, J., and Kang, S. (2015). A study on the application and effect analysis monitoring of LID technique in new town city (I) LID technique selection and optimum size estimate. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 291-299.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Statistics of waterworks*.
- Yeon, J.S., Jang, Y.S., Lee, J.H., Shin, H.S., and Kim, E.S. (2014). Analysis of stormwater runoff characteristics for spatial distribution of LID element techniques using SWMM. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 3983-3989.

---

<b>Received</b>	October 29, 2020
<b>Revised</b>	October 29, 2020
<b>Accepted</b>	November 9, 2020