



## Development of a quantification method for modelling the energy budget of water distribution system

Choi, Doo Yong<sup>a\*</sup> · Kim, Sanghyun<sup>b</sup> · Kim, Kyoung-Pil<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Head Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

<sup>c</sup>Senior Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

Paper number: 22-065

Received: 31 August 2022; Revised: 29 September 2022; Accepted: 5 October 2022

### Abstract

Efforts for reducing greenhouse gas emission coping with climate change have also been performed in the field of water and wastewater works. In particular, the technical development for reducing energy has been applied in operating water distribution system. The reduction of energy in water distribution system can be achieved by reducing structural loss induced by topographic variation and operational loss induced by leakage and friction. However, both analytical and numerical approaches for analyzing energy budget of water distribution system has been challengeable because energy components are affected by the complex interaction of affecting factors. This research drew mathematical equations for 5 types of state (hypothetical, ideal, leak-included ideal, leak-excluded real, and real), which depend on the assumptions of topographic variation, leakage, and friction. Furthermore, the derived equations are schematically illustrated and applied into simple water network. The suggested method makes water utilities quantify, classify, and evaluate the energy of water distribution system.

**Keywords:** Water distribution system, Energy analysis, Leakage, Friction loss, Topographic variation

## 상수관망 에너지 모의를 위한 정량화 분석기법 개발

최두용<sup>a\*</sup> · 김상현<sup>b</sup> · 김경필<sup>c</sup>

<sup>a</sup>한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원, <sup>b</sup>부산대학교 환경공학과 교수, <sup>c</sup>한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원

### 요 지

기후변화에 대처하기 위한 온실가스 저감 노력은 상수도 분야에서도 활발하게 진행되어 왔으며, 특히, 상수도 생산 및 공급과정에서 많은 에너지를 소비하는 상수관망의 에너지를 절감하기 위한 많은 기술개발이 이루어져왔다. 상수관망의 에너지 절감은 지형의 기복으로 발생하는 구조적 손실의 저감과 누수 및 마찰손실로 인한 운영 상 손실의 효율화를 통해 성취될 수 있음에도 실제 상수관망의 에너지 수치를 분석하는 단계에서 이들 인자들 상호간의 복합적 작용으로 인해 해석적인 접근뿐 아니라 수치모형을 이용한 모의에서도 한계를 노출하여 왔다. 본 연구에서는 지형의 기복, 누수 및 마찰손실의 유무에 따라 변화하는 유량, 압력수두 및 에너지를 5가지의 상수관망 상태(가설적 상태, 이상적 상태, 누수가 포함된 이상적 상태, 누수가 배제된 실제 상태, 실제 상태)에 대하여 수리 물리적 방정식을 도출하고, 이를 단순한 형태의 상수관망에 적용함으로써 에너지의 정량적 분석 및 분류, 각종 에너지 수치 구성요소별 분석과 이를 이용한 상수도 시스템의 에너지 진단이 가능하도록 하였다.

**핵심용어:** 상수관망, 에너지 분석, 누수, 마찰손실, 지형의 기복

\*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7506

E-mail: dooyong@kwater.or.kr (Choi, Doo Yong)

## 1. 서론

기후위기에 대처하기 위한 탄소 저감 및 중립을 위한 노력은 선진국들을 중심으로 활발하게 진행되어 왔으며, 지난 2016년 11월 기후변화협약 당사국총회에서 채택된 파리협정(Paris agreement)에 따라 2050년까지 전 지구의 온실가스 배출량을 '0(zero)'으로 감축하기 위한 국제적 노력을 기울이고 있다. 우리나라도 기후변화 대응을 위한 국제사회의 노력에 동참하고자 2020년 12월에 2050년까지의 탄소중립 계획이 포함된 '2050 Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies (LEDS)'를 제출한바 있으며, 이에 따라 2018년 대비 약 436.6 백만톤CO<sub>2</sub>eq의 온실가스 감축목표를 제시하였다. 물 분야는 기후변화의 위협을 가장 크게 받는 분야이지만, 상하수도 보급으로 인한 과도한 에너지 사용 및 탄소배출은 기후변화를 가속화시키는 요인으로 작용하여 왔다(K-water, 2021).

상하수도 분야의 에너지 사용량 또는 온실가스 배출량을 정량화하여 현황을 집계, 분석하고자 하는 많은 시도들이 물 관련 연구기관에서 수행되어 왔다. 대표적인 사례로는 미국 환경보호청의 중소규모 상하수도 에너지 사용량 평가 시스템, 국제물협회(IWA)의 에너지 및 탄소배출량 평가 프로그램, 미국 수도협회의 수도시설 에너지 평가 모형 등이 제안되어 왔다(Carlson and Walburger, 2007; EPA, 2012; WaCCliM, 2018). 이들 기존의 연구결과들은 하향식(top-down)의 에너지 사용량 분석기법을 채택하여 모든 수도사업자들의 자료를 일정한 기준으로 쉽게 정리할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 각각의 수도시설의 에너지 이용여건을 감안한 실제 에너지 저감을 위한 실행계획 수립을 위해서는 적합하지 않다. 예를 들어, 취수원이 산악의 고지대에 위치하는 A 수도사업체와 지하수를 수원으로 이용하는 B 수도사업체의 에너지 사용량을 비교하면, B 수도사업체가 단위체적의 수돗물을 생산, 공급하기 위하여 소요되는 에너지가 큰 것은 당연하다. 그러나 하향식 평가기법은 일률적인 평가방식에 의해 단순히 B 수도사업체가 A 수도사업체보다 에너지 효율이 높다는 것만을 평가할 뿐 상수도 시스템의 고유한 수돗물 생산 및 공급 여건을 반영하지 못한다.

반면, Pelli and Hitz (2000)는 이러한 문제점 개선을 위해 수용가 → 급배수관망 → 배수지 → 송수관로 → 정수장 → 도수관로 → 취수원으로 연결되는 공급망 단계별 에너지를 수학적 또는 물리적으로 계산하는 방식을 채택하는 상향식(bottom-up) 에너지 평가 방식을 도입하였다. Pelli and Hitz (2000)는 상수관망 에너지를 평가하고 지표 화하는데 최소 에너지(minimal energy)라는 새로운 개념을 도입하여 서로 다른 용수공급 시스템을 동일한 기준을 가지고 평가하는데

기여를 하였다. 이들은 관로시스템 상에서 소모되는 에너지를 누수나 마찰손실이 없는 이상적인 상태와의 비교를 통하여 기간시설 지표(infrastructure indicator)와 운영품질 지표(operational quality indicator)를 구분하여 제시하였다. 여기서, 기간시설 지표는 시설물이 건설된 단계에서 고정적으로 가지고 있는 에너지를 나타내는 지표이며, 운영품질 지표는 수도사업자의 노력에 의하여 변동될 수 있는 효율성을 나타내는 지표이다. 이후, 상수관망의 에너지를 정량화하려는 후속 연구결과들이 제시되어 왔으며, Cabrera *et al.* (2010)은 검사체적(control volume)을 도입하여 용수공급 시스템에 공급되는 에너지와 소모되는 에너지를 도식화하였으며, 수학적 접근이 가능하도록 검사체적 내의 관계식을 유도하였다. 후속 연구에서 Cabrera *et al.* (2014)은 압력 상수관망 검사체적 내의 에너지 수지에 감압밸브(Pressure Reducing Valve, PRV)에 의한 에너지 손실과 압력터빈(Pump to work As Turbine, PAT)에 의한 에너지 변환을 추가하여 에너지 유출입 과정을 세분화하였다. Mamade *et al.* (2017)은 에너지의 사용 및 손실의 측면에서 에너지를 분석하는 방법을 제안하였다. 즉, 공급되는 모든 에너지를 사용량(authorized consumption)과 손실량(water loss)에 따라 분리하여 각각의 원인별로 에너지를 산출하는 방식을 제안하였다. Gómez *et al.* (2018)은 기존의 연구들과는 다른 관점에서 에너지 수지(energy budget)를 운영상 손실(operational loss), 구조적 손실(structural loss), 공급되는 에너지(energy delivered), 잉여에너지(excess of energy) 등으로 세분화하여 제시하였다. 국내에서는 Kim *et al.* (2013)이 Cabrera *et al.* (2010)의 접근법을 이용해 실제 상수관망의 에너지 분석 및 평가에 적용한 사례가 있으며, Jeong and Kang (2017)은 상수관망의 신뢰도 지수 적용에서 에너지 소개한 바 있다. 지금까지의 연구 성과에도 불구하고, 상수도 공급계통에 대해 관망해석 프로그램과 연계한 에너지 모의를 수행하는 경우 누수 및 마찰의 복합적 작용에 의한 손실의 변동성은 에너지 수지의 구성요소에 대한 정량화된 분석과 관망해석 모형을 이용한 실적용의 문제를 초래하여 왔다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시되었던 상수관망 에너지 분석을 위한 요소별 구분을 명확히 하고, 실제 상수관망에서 발생하고 있는 누수 및 마찰손실 변동에 따른 에너지의 변화량이 다른 요소들에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 특히, 지형의 기복, 누수 및 마찰손실의 유무에 따라 변화하는 유량과 에너지를 5가지의 상수관망 상태 분류를 통해 에너지를 산정하는 방법을 제시하고자 한다. 이렇게 분류된 5가지의 상태에 대한 에너지 분석결과를 이용해 실제 상수관망 에너지의 구성요소별 수지를 분석하는 방법을 모의관망을 통해 제시하고자 한다.

## 2. 상수관망의 에너지 수지 및 분석

### 2.1 상수관망 에너지의 발생원별 분류

상수도 공급계통에 대한 관망해석 모델링에서는 상수관망을 구성하는 물리적 요소를 크게 절점(node)과 링크(link)로 분류한다. 세부적으로 구분하면 절점은 격점(junction), 탱크(tank), 저수지(reservoir)로 나누며, 링크는 관로(pipe), 펌프(pump), 밸브(valve)의 총 6개 물리적 요소로 구성되어 있다. 최근에는 관로 상의 잔류압력을 이용하여 전력을 생산하는 PAT (Pump as Turbine) 등의 마이크로 터빈(micro turbine)이 도입되고 있으며 이를 링크에 포함해 터빈(turbine) 요소로 해석할 수도 있다. 실제 관로에서 발생하는 누수(leakage)를 모의하고자 관망해석 모형에서는 격점에 에미터(emitter)라는 압력비례형 손실유량을 모의할 수 있도록 하였다.

상수관망의 에너지 수지를 발생원별과 기능적으로 나타내

면 Table 1과 같이 분류될 수 있다. 실제 상수관망에서 에너지의 공급, 수요 및 손실을 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 에너지 관점에서 상수도로 공급되는 에너지(input energy)는 기준면(datum) 대비 저수지의 표고에 따라 가지게 되는 중력(gravitational force)에 의한 위치 에너지인 자연적 공급에너지(natural input energy)와 펌프(pump) 등 전기적으로 공급되는 에너지인 동력 공급에너지(shaft input energy)로 구분될 수 있다. 이 때 기준면은 용수수요 격점(Fig. 1의 ●)들 중 가장 낮은 곳에 위치한 것을 선정한다. 상수도에서 소모되는 에너지를 발생원별로 분류하면, 사용자에게 공급되는 에너지(energy supplied to users), 마찰에 의한 에너지 손실(friction energy losses), 누수에 의한 에너지 손실(leak energy losses), 탱크에 의한 에너지 소모 및 탱크로의 공급(tank energy compensation), 터빈에 의한 전기에너지 생산(turbine energy generation)으로 구분할 수 있다. 이 때 마찰에

Table 1. Performance indicator to evaluate energy in water supply networks

Input energy	Natural input energy	Output energy	Energy supplied to users	Minimum required energy by users	Energy delivered
				Supplied excess energy	Structural energy loss
			Friction energy losses	Energy losses in pipe friction	Operational energy loss
				Energy losses in pumps	
	Energy losses in valves				
	Energy losses in turbines				
	Leak energy losses		Energy losses in pipe leaks		
	Shaft input energy		Tank energy compensation	Energy compensation by tanks	Energy compensated
Turbine energy generation		Energy generation from in-pipe turbines	Energy delivered		

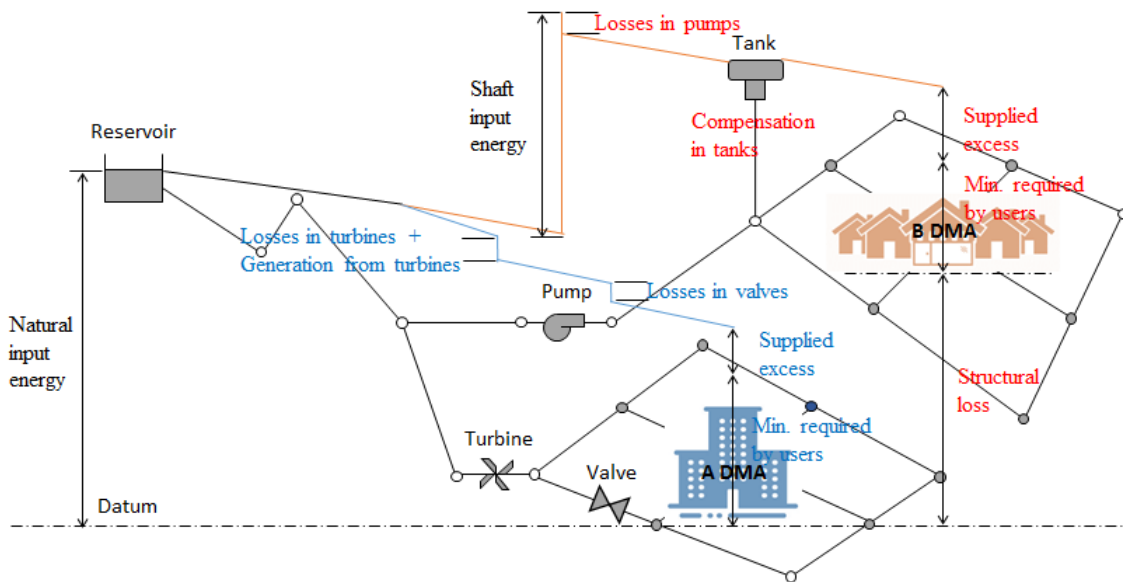


Fig. 1. Schematic representation of energy components for water distribution system

의한 에너지 손실은 관로내의 마찰손실을 포함한 소손실, 감압밸브(pressure reducing valve) 등에 의한 에너지 손실, 펌프의 기계 전기적 효율에 의한 에너지 손실, 관로내 마이크로 수력발전 장치에 의한 에너지 손실을 포함한다.

## 2.2 상수관망 에너지의 기능적 분류

Table 1의 우측 열은 상수관망에서 소모되는 에너지를 기능별로 나타낸 것이다. 발생원별로 구분한 사용자에게 공급되는 에너지는 실제 사용자에게 요구되는 최소에너지(minimum required energy by users) 범위인 0.5~1.5 kg/cm<sup>2</sup>의 잔류압력만이 유용하게 이용되며(energy delivered), 그 이상의 압력으로 공급되는 잉여에너지(supplied excess energy)는 불필요하게 낭비되며 이를 기능적 측면에서 구조적 에너지 손실(structural energy loss)로 표현된다. 구조적 에너지 손실은 Pelli and Hitz (2000)가 최초 제시하였던 기간시설 지표(infrastructure indicator)와 유사한 개념으로서, 상수도 시설물의 계획 및 설치 시에 확정되는 손실로서 수도사업자의 운영 효율 개선에 의해 향상되지 않는다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 동일한 수원(reservoir)을 가지는 상수도를 A 소블록(District Metered Area, DMA)와 B 소블록에 공급하는 경우, A 소블록에서는 터빈에 의해 전기가 생산되는 반면, B 소블록에서는 펌프의 운용을 위한 많은 에너지가 소모된다. A 소블록과 B 소블록을 단순 비교하면, A 소블록이 에너지 이용 측면에서 우수한 것으로 평가될 수 있다. 그러나 실제 상수도 용수공급에 있어 B 소블록과 같이 고지대에 위치한 경우 또는 수용가 간 지형의 기복이 심한 경우 발생하는 구조적 에너지 손실을 구분하는 것이 수도사업장 간의 에너지 효율을 분석·평가하는데 중요하다. 특히, Gómez *et al.* (2018)은 구조적 에너지 손실을 관리가 가능한 손실(manageable topographic loss)과 피할 수 없는 손실(unavoidable topographic loss)로 구분하기까지 하였다.

운영에너지 손실(operational energy loss)은 마찰과 누수에 의한 에너지 손실을 의미한다. 모든 실세계에서는 마찰에 의한 손실은 필수불가결하게 발생될 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고, 관로내의 마찰 손실을 적게 하기 위한 관내부 세척, 효율이 높은 펌프의 적용 등 수도사업자의 운영관리 노력의 여하에 따라 많은 차이가 발생할 수 있다. 특히, 누수에 의해 낭비되는 물은 추가적인 수돗물 생산을 수반되며, 이렇게 생산된 용수 또한 당초 설계된 유량보다 큰 유량을 관로에서 이송함으로써 비선형적 마찰손실이 증가하는 요인으로 발생된다.

탱크에 의한 에너지 소모 및 탱크로의 공급은 기능적 관점에서 에너지 유출입량(energy compensated)이 시간대에 따라 변화함을 나타낸다. 관망해석에서 오랜기간 동안 에너지

유출입량의 합을 계산하면 '0'이 되며, 상수도 공급시스템의 에너지 공급, 수요 및 손실에 영향을 미치지 않는다. 상수관망 시스템 중에 마이크로(micro) 또는 피코(pico) 용량의 터빈이 설치되어 잔류압력을 이용하여 전기에너지를 생산하는 경우, 당해 에너지는 외부의 전력시스템에 공급되거나, 내부적인 전기에너지 수요에 활용될 수 있다. 따라서 본 에너지는 사용자에게 유용하게 이용되는 에너지(energy delivered)로 분류될 수 있다.

## 2.3 마찰과 누수에 의한 에너지 손실

발생원별 또는 기능적 분류에 의해 관망해석 모형과 연계하여 에너지를 산정하는 경우, 마찰, 누수 등 변동성이 발생하는 에너지 항목에 의해 실제 에너지 소모량 또는 손실량을 계산하는데 어려움이 직면한다. Fig. 1의 A 소블록과 B 소블록 모두 잉여에너지로 인한 구조적 에너지 손실이 발생한다. 이때, 저수지로부터 사용자에게 이르는 상수관망에서 마찰에 의한 과도한 에너지 손실이 발생하는 경우 구조적 에너지 손실량이 적어지는 효과를 가져온다. 즉, 전체 상수관망의 에너지에서 지형의 기복 등에 의해 내재적으로 발생하는 에너지 손실과 운영자의 노력에 의해 절감할 수 있는 에너지 손실을 구분하려던 당초의 에너지 분석 목적에 위배되는 결과를 초래한다. 추가적인 문제점은 운영에너지 손실을 구성하는 2가지 요소인 마찰에 의한 손실과 누수에 의한 손실을 구분하는 데 어려움이 있다는 것이다. 누수에 의해 발생하는 추가적인 용수 공급은 사용자에게 공급되는 관로에서의 마찰에 의한 에너지 손실을 증가시키는 반면, 누수에 의해 저하된 압력손실 만큼 각 격점에서의 누수량이 적어지는 효과를 가져오게 된다. 즉, 절감된 누수량만큼의 에너지 손실이 적어지는 효과를 가져오게 된다. 결론적으로 마찰과 누수에 의한 에너지 손실량의 불명확한 계산은 구조적 에너지 손실량 계산결과와의 모순을 초래하며, 실제 상수관망에서 발생하는 운영에너지 손실을 물리적 요소별 또는 에너지 구성요소별로 할당하는 데 어려움을 초래한다.

## 3. 상수관망 상태별 에너지 분석 정량화 기법

### 3.1 상수관망의 5가지 상태 정의

상수관망 에너지 분석의 정량적 계산을 어렵게 하는 마찰과 누수의 변동성을 구체화하고, 이로 인해 발생하는 구조적 에너지 손실량의 변동성을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 상수관망의 상태를 지형기복의 변화(topographic variation),

누수(leaks), 마찰손실(friction loss)의 가정에 따라 Table 2와 같이 5가지의 상수관망 상태를 정의하였다. 먼저 가설적 상태(hypothetical state)에서는 Fig. 2(a)와 같이 모든 상수관망이 기준면(datum)에 위치하며, 누수와 마찰손실이 없는 실제 존재하지 않는 상태를 정의하였다. 둘째, 이상적 상태(ideal state)에서는 Fig. 2(b)와 같이 상수관망이 부설되는 지형기복의 변화는 고려하되, 누수와 마찰손실과 같은 운영에너지 손실이 없는 이상적인 상태를 정의하였다. 셋째, 누수가 포함된 이상적 상태(leak-included ideal state)에서는 Fig. 2(c)와 같이 지형기복의 변화와 누수의 존재는 포함시키되, 마찰손실이 없는 상태를 정의하였다. 넷째, 누수가 배제된 실제 상태(leak-excluded real state)에서는 Fig. 2(d)와 같이 모든 상수관망의 상태는 실제의 운영조건과 동일하나, 누수만 고려하지 않은 상태를 정의하였다. 마지막으로 실제 상태(real state)에서는 Fig. 2(e)와 같이 실제의 상수관망 운영에서 존재하는 지형의 기복, 누수, 마찰손실을 모두 고려한 상태를 정의하였다.

### 3.2 상수관망 상태별 수리적 변수 및 에너지의 산정

물이 가지고 있는 단위시간당 에너지( $E$ )는 다음의 식으로

정의된다.

$$E = \gamma QH \tag{1}$$

여기서  $\gamma$ 는 물의 단위중량을,  $Q$ 는 유량을,  $H$ 는 압력수두를 나타낸다. 상수관망 에너지의 산정에서 물의 단위중량은 일정하므로, 일반적으로 에너지의 계산에서는 유량과 압력수두를 계산함으로써 완성될 수 있다. 실제 상수관망의 운영에서 유량은 관로 내를 흐르는 단위시간당 체적으로 정의되나, 관망 해석에서는 연속방정식에 의해 관로 내를 흐르는 유량의 합은 누수가 없는 경우 각 절점에 할당된 용수수요량(demand)의 합과 동일하며, 누수가 있는 경우 각 격점에 할당된 용수수요량과 누수량(leak)의 합으로 정의될 수 있다. 특히, 누수량은 각 격점에서의 압력에 비례하며 누수가 존재하는 관로의 상하류 격점에 에미터 계수(emitter coefficient)로 설정할 수 있다. 즉, 상수관망의 에너지 계산을 위한 모의는 절점에서의 수리적 변수인 용수수요량, 누수량, 압력수두의 계산만으로 가능하다는 것을 알 수 있다.

앞서 정의된 상수관망의 5가지 상태를 압력수두(head)의

Table 2. Five different types of the state of water distribution system

Types	Assumptions	Equations	Calculation
Hypothetical state	No topography No leaks No friction loss	· Head: $z_i = 0$ for $i = 1, \dots, n$ $h_i = H_R$ for $i = 1, \dots, n$ · Flow: $Q_R = \sum_{i=1}^n q_i$ · Energy: $E_{hypo} = Q_R H_R$	Manually calculated
Ideal state	Yes topography No leaks No friction loss	· Head: $h_i = H_R - z_i$ for $i = 1, \dots, n$ · Flow: $Q_R = \sum_{i=1}^n q_i$ · Energy: $E_{ideal} = \sum_{i=1}^n q_i h_i = \sum_{i=1}^n q_i (H_R - z_i)$	Manually calculated
Leak-included ideal state	Yes topography Yes leaks No friction loss	· Head: $h_i = H_R - z_i$ for $i = 1, \dots, n$ · Flow: $Q'_R = \sum_{i=1}^n q_i + \sum_{i=1}^n l_i = Q_R + \sum_{i=1}^n l_i$ · Energy: $E_{leak} = \sum_{i=1}^n (q_i + l_i) h_i = \sum_{i=1}^n (q_i + l_i) (H_R - z_i)$	Can't calculated
Leak-excluded real state	Yes topography No leaks Yes friction loss	· Head: $h'_i = H_R - z_i - \Delta h_i$ for $i = 1, \dots, n$ · Flow: $Q_R = \sum_{i=1}^n q_i$ · Energy: $E_{fric} = \sum_{i=1}^n q_i h'_i = \sum_{i=1}^n q_i (H_R - z_i - \Delta h_i)$	Model calculated
Real state	Yes topography Yes leaks Yes friction loss	· Head: $h''_i = H_R - z_i - \Delta h'_i$ for $i = 1, \dots, n$ · Flow: $Q''_R = \sum_{i=1}^n q_i + \sum_{i=1}^n l'_i = Q_R + \sum_{i=1}^n l'_i$ · Energy: $E_{real} = \sum_{i=1}^n (q_i + l'_i) h''_i = \sum_{i=1}^n (q_i + l'_i) (H_R - z_i - \Delta h'_i)$	Model calculated

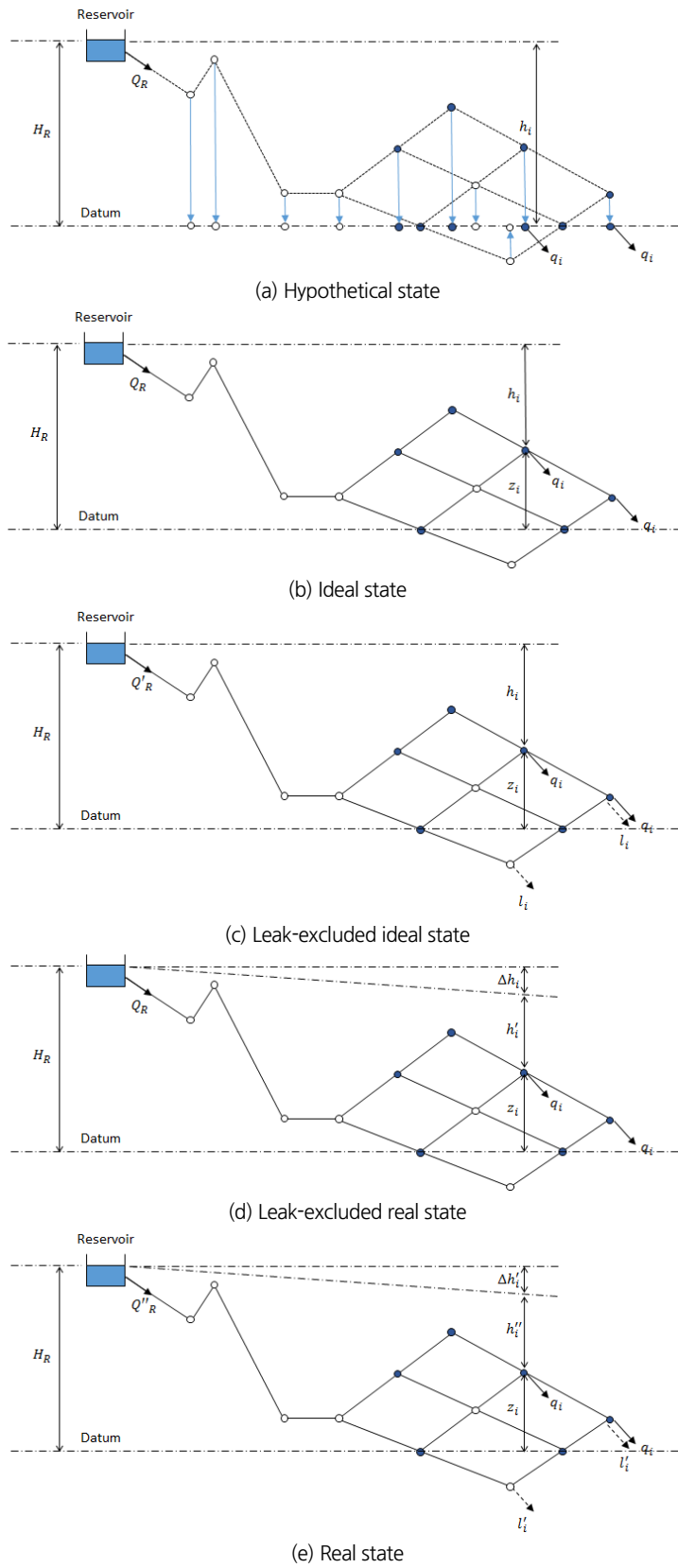


Fig. 2. Schematic representation of head and flow in water distribution system

측면에서 살펴보면 다음과 같다. 기준면(datum)으로부터 저수지까지의 동수두를  $H_R$ 로, 격점까지의 표고(또는 위치수두)를  $z_i$ 로 정의하면, 먼저 가설적 상태(Fig. 2(a))에서는 모든 격점의 표고가 기준면에 위치하므로, 위치수두는 '0'이 된다. 따라서 모든 격점의 압력수두( $h_i$ )는 저수지의 동수두와 동일한 값을 갖는다. 둘째, 이상적 상태(Fig. 2(b)) 및 누수가 포함된 이상적 상태(Fig. 2(c))에서는 마찰에 의한 수두 손실이 없으므로 격점의 압력수두( $h_i$ )는 저수지의 동수두에서 각 격점의 위치수두를 뺀  $H_R - z_i$ 이 된다. 셋째, 누수가 배제된 실제 상태(Fig. 2(d))에서는 용수사용량만을 고려한 마찰에 의한 격점의 수두손실( $\Delta h_i$ )를 추가적으로 공제한  $H_R - z_i - \Delta h_i$ 이 격점의 압력수두( $h'_i$ )가 된다. 마지막으로, 실제 상태(Fig. 2(e))에서는 용수사용량과 누수를 함께 고려한 마찰에 의한 격점의 수두손실( $\Delta h'_i$ )를 추가적으로 공제한  $H_R - z_i - \Delta h'_i$ 이 격점의 압력수두( $h''_i$ )가 된다.

또한 상수관망의 5가지 상태를 유량(flow)이 측면에서 살펴보면 다음과 같다. 먼저 누수의 영향을 고려하지 않는 가설적 상태, 이상적 상태, 누수가 배제된 실제 상태(Figs. 2(a), 2(b), 2(d))에서는 각 격점에서의 용수수요량의 합( $\sum_{i=1}^n q_i$ )은 저수지로부터 유출되는 유량( $Q_R$ )이 된다. 둘째, 누수가 포함된 이상적 상태(Fig. 2(c))에서는 용수수요량의 합과 각 격점에 할당된 누수량의 합( $\sum_{i=1}^n l_i$ )을 더한 값이 저수지로부터 유출되는 유량( $Q'_R$ )이 된다. 그러나 실제 관망해석에서는 각 격점에 에미터 계수를 할당하며, 이렇게 할당된 계수는 압력수두와의 상관관계에 의하여 누수량을 산정하나, 실제 관로내의 마찰특성을 나타내는 조도계수(Hazen-Williams의 C값)을 마찰이 없는 상태로 설정하는 것이 불가능하므로 각 격점의 누수량( $l_i$ )은 계산이 불가능하다. 마지막으로 실제 상태(Fig. 2(e))에서는 용수수요량의 합과 각 격점에 할당된 누수량의 합( $\sum_{i=1}^n l'_i$ )을 더한 값이 저수지로부터 유출되는 유량( $Q''_R$ )이 된다.

이상의 과정으로 계산된 압력수두와 유량의 곱으로 5가지 상수관망 상태에 대한 에너지의 계산하면 Table 2와 같이 정리될 수 있다. 계산된 5종 에너지들( $E_{hypo}$ ,  $E_{ideal}$ ,  $E_{leak}$ ,  $E_{fric}$ ,  $E_{real}$ )의 비교를 통하여 지형기복의 변화(topographic variation), 누수(leaks), 마찰손실(friction loss)의 유무에 따른 영향을 평가할 수 있다. 5종의 에너지 크기를 비교하면 다음의 대소 관계가 도출될 수 있다. 첫째,  $E_{hypo}$ ,  $E_{ideal}$ ,  $E_{fric}$ 의 유량은 동일하므로 에너지의 크기는 압력수두에 의해 결정된다. 따라서 압력수두의 크기에 따라  $E_{hypo} > E_{ideal} > E_{fric}$ 의 성립이 가능하다.

둘째,  $E_{leak}$ 과  $E_{real}$ 의 비교에서 마찰손실이 없는 상태의 누수량( $l_i$ )은 수두손실을 무시할 수 있으므로 압력수두의 크기가 커져 마찰손실이 있는 상태의 누수량( $l'_i$ )에 비하여 항상 큰 값을 갖는다. 여기에 더하여 압력수두 또한 큰 값을 가지므로  $E_{leak} > E_{real}$ 의 성립이 가능하다. 셋째,  $E_{ideal}$ 과  $E_{leak}$ 의 비교에서 압력수두는 동일하므로 에너지의 크기는 유량에 의해 결정된다. 따라서 유량의 크기에 따라 누수량을 포함하고 있는 상태가 관로 내를 흐르는 유량이 더 크며  $E_{leak} > E_{ideal}$ 의 성립이 가능하다. 반면,  $E_{fric}$ 과  $E_{real}$ 의 비교에서는  $E_{real}$ 이 큰 유량을 가지고 있으나, 압력수두의 값은 격점마다 상이하므로 누수가 발생한 위치 및 크기에 따라 두 에너지의 대소가 결정된다.

관망해석 프로그램을 이용하여 에너지를 산정하는 관점에서는 누수가 배제된 실제 상태(leak-excluded real state)와 실제 상태(real state)의 2가지에 대한 모의가 가능하다. 또한 가설적 상태(hypothetical state) 및 이상적 상태(ideal state)는 상수관망에 대한 입력 자료가 구성되면 간단한 계산 또는 관망해석 프로그램과 연계된 계산만으로 압력수두, 유량 및 에너지의 산정이 가능하다. 반면, 누수가 포함된 이상적 상태(leak-included ideal state)는 마찰이 없는 상태의 누수량 산정이 불가능하여 실제 계산은 불가능하다. 그럼에도 불구하고 본 상태는 나머지 4개의 상수관망 상태와의 비교를 통해 지형기복의 변화, 누수, 마찰손실의 영향을 구분하는데 효과적인 개념을 내포하고 있다.

## 4. 단순예제를 이용한 상수관망의 모의 및 에너지 분석

### 4.1 단순예제의 입력자료 구성

본 연구에서 개발된 에너지 정량화 분석기법을 테스트하기 위하여 관망해석 프로그램인 EPANET2의 입력 자료를 Fig. 3과 같이 구성하였다(Rossman, 2000). 본 상수관망은 16개의 관로, 5개의 용수수요 격점을 포함한 12개의 격점, 고정수두절점(fixed grade node)인 1개의 저수지로 구성되어 있으며, 관로의 속성과 절점의 속성은 각각 Tables 3 and 4에 나타내었다. 관경은 100~300 mm로 구성되어 있으며, 관로의 길이는 500~2,500 m에 분포되어 있으며, Hazen-Williams의 조도계수는 모든 관로에서 동일한 값인 100을 가지는 것으로 가정하였다. EPANET2에서는 누수량( $Q_L$ )은 발생 특성 및 정도에 따라 에미터(emitter)의 압력지수(pressure exponent)  $\alpha$ 와 유량계수(discharge coefficient)  $C$ 를 다음의 식에 따라 각각 격점에 설정한다.

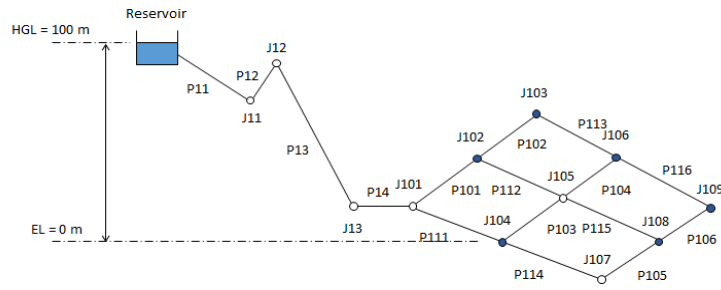


Fig. 3. Schematic diagram of simple water distribution system

Table 3. Pipe attributes of simple water distribution system

Pipe	Diameter (mm)	Length (m)	Roughness
P11	300	1,000	100
P12	300	500	100
P13	250	2,500	100
P14	250	800	100
P101	150	1,000	100
P102	150	1,000	100
P103	100	1,000	100
P104	100	1,000	100
P105	150	1,000	100
P106	150	1,000	100
P111	150	1,200	100
P112	100	1,200	100
P113	150	1,200	100
P114	150	1,200	100
P115	100	1,200	100
P116	150	1,200	100

Table 4. Node attributes of simple water distribution system

Node	Elevation (m)	Demand (CMD)	Emitter Coeff.
Reservoir	100.0		
J11	70.0		
J12	80.0		
J13	10.0		6
J101	10.0		8
J102	20.0	400	12
J103	30.0	300	
J104	0.0	500	15
J105	10.0		25
J106	20.0	600	
J107	-10.0		4
J108	0.0	600	6
J109	10.0	300	8

$$Q_L = C(2gH_L)^\alpha \tag{2}$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도이다. 본 예제에서는 누수를 모의하기 위하여 압력지수  $\alpha=0.5$ 로 설정하였으며, 각 격점별 에미터 계수는 Table 4에 나타난 바와 같이 설정하였다.

#### 4.2 관망해석 결과 및 에너지 계산결과 도출

에너지 정량화 분석기법의 적용을 위한 관망해석은 누수가 배제된 실제 상태(leak-excluded real state)와 실제 상태(real state)에 대하여 EPANET2를 이용해 수행되었다. 관망해석을 통해 도출된 절점별 결과와 관로별 결과는 Tables 5 and 6에 나타내었다. 가설적 상태(hypothetical state) 및 이상적 상태(ideal state)에 대한 절점별 결과 및 관로별 결과는 관망해석 모형의 수행 없이 입력자료로부터 간단히 계산될 수 있으므로 별도로 나타내지 않았다.

각 절점별, 관로별로 도출된 수리해석 결과로부터 와트(Watt)로 표시되는 단위시간당 에너지는 Eq. (1)로부터 계산될 수 있다. 이때, 유량의 단위를  $m^3/day$ 로부터  $m^3/s$ 로 환산하는 것에 유의하여야 한다. 이렇게 계산된 단위시간(sec)당 에너지는 아래의 식으로부터 연간 전력사용량(Wh)의 단위로 에너지(EY)가 계산된다.

$$EY(Wh) = E(Watt) \times 31,536,000(sec\ to\ year) \times 1/3,600(Joule\ to\ Wh) \tag{3}$$

연간 전력사용량으로 다음의 식에 의하여 연간 온실가스 배출량으로 환산될 수 있다.

$$CO_2\ emission(CO_2e) = EY(Wh) \times 0.0004594(Wh\ to\ CO_2e) \tag{4}$$

여기서 0.0004594는 우리나라의 전력배출계수로 단위전력량(Wh)을 생산하는데 배출되는 온실가스량(CO<sub>2</sub>e)을 의미



**Table 5.** Node results of simple water distribution system

Node ID	Leak-excluded real state		Real state	
	Flow (CMD)	Pressure (m)	Flow (CMD)	Pressure (m)
Reservoir	-2700.00	0.00	-3349.22	0.00
J11	0.00	28.79	0.00	28.19
J12	0.00	18.18	0.00	17.29
J13	0.00	80.82	52.42	76.32
J101	0.00	78.46	68.31	72.91
J102	400.00	57.98	483.62	48.55
J103	300.00	44.38	300.00	34.08
J104	500.00	77.45	623.04	67.28
J105	0.00	65.19	183.06	53.62
J106	600.00	52.61	600.00	41.59
J107	0.00	84.89	34.41	74.01
J108	600.00	72.76	647.07	61.54
J109	300.00	62.50	357.30	51.31
Sum	2700.00		3349.23	

**Table 6.** Pipe results of simple water distribution system

Link ID	Leak-excluded real state			Real state		
	Flow (CMD)	Velocity (m/s)	Headloss (m/km)	Flow (CMD)	Velocity (m/s)	Headloss (m/km)
P11	2700.00	0.44	1.21	3349.22	0.55	1.81
P12	2700.00	0.44	1.21	3349.22	0.55	1.81
P13	2700.00	0.64	2.95	3349.22	0.79	4.39
P14	2700.00	0.64	2.95	3296.81	0.78	4.26
P101	1398.34	0.92	10.48	1656.76	1.09	14.35
P102	784.83	0.51	3.60	882.73	0.58	4.47
P103	210.11	0.31	2.26	272.92	0.40	3.67
P104	225.53	0.33	2.57	198.05	0.29	2.02
P105	591.54	0.39	2.13	641.37	0.42	2.48
P106	189.63	0.12	0.26	176.53	0.12	0.23
P111	1301.66	0.85	9.18	1571.74	1.03	13.02
P112	213.51	0.31	2.33	290.42	0.43	4.11
P113	484.83	0.32	1.47	582.73	0.38	2.07
P114	591.54	0.39	2.13	675.78	0.44	2.73
P115	198.09	0.29	2.02	182.23	0.27	1.73
P116	110.37	0.07	0.10	180.78	0.12	0.24

하며, 전력생산에 이용되는 에너지원의 종류 및 구성비에 의해 달라질 수 있다.

#### 4.3 단순한 상수관망의 에너지 요소별 분석

단순한 상수관망에 대하여 총 4가지 상태에 대한 해석 결과

를 바탕으로 다양한 에너지 요소별 분석을 실시할 수 있다. 본 연구에서는 Table 7과 같이 각 절점(node)의 수리적 결과 값으로부터 도출되는 총 공급에너지(total energy supplied), 사용자에게 공급되는 에너지(energy delivered to consumers), 누수를 배제하는 상태에서의 구조적 에너지 손실(structural energy loss excluding leaks), 누수를 포함하는 상태에서의 구조적 에너지 손실(structural energy loss including leaks), 누수와 마찰에 의한 에너지 손실(leak and friction energy loss) 과, Table 8과 같이 각 링크(link)의 수리적 결과 값으로부터 도출되는 누수를 배제하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실(pipe energy loss for leak-excluded state), 누수를 포함하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실(pipe energy loss for leak-included state)에 대한 에너지 요소별 분석방법을 제시하였다. 상수관망이 본 논문의 단순한 상수관망이 아닌 관로(pipe) 이외의 펌프, 밸브 등의 링크 요소를 가지는 경우 운영자는 각각에 대하여 본 정량화 분석기법을 적용할 수 있으며, 절점에 해당되는 에너지 요소들에 대해서도 다양한 분석결과를 제시할 수도 있다.

절점의 수리적 결과 값으로부터 도출되는 에너지 요소를 설명하면, 먼저 총 공급에너지는 실제 상태의 유량( $Q''_R = \sum_{i=1}^n q_i + \sum_{i=1}^n l'_i$ )과 가설적 상태의 압력수두( $h_i = H_R$ )의 곱에 의해 산정될 수 있다. 둘째, 사용자에게 공급되는 에너지는 실제 사용자에게 공급되는 최소에너지와 잉여 공급에너지로 구분된다. 사용자에게 공급되는 에너지는 용수수요량( $Q_R = \sum_{i=1}^n q_i$ )과 실제 상태의 압력수두( $h''_i = H_R - z_i - \Delta h'_i$ )의 곱으로 산정될 수 있으며, 실제 사용자에게 공급되는 최소에너지는 용수수요량에 본 연구에서 설정한 잔류압력인  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력수두에 해당되는 5 m를 곱하여 산정될 수 있다. 당연히 잉여 공급에너지는 두 에너지의 차이로 산정될 수 있다. 셋째, 누수를 배제하는 상태에서의 구조적 에너지 손실은 용수수요량과 위치수두( $z_i$ )의 곱으로 산정될 수 있다. 이 중에서 Gómez et al. (2018)에 의한 관리가 가능한 손실은 용수수요량과 이상적 상태에서 압력수두의 최소치( $\text{Min}(h_i)$ )의 곱으로 산정할 수 있으며, 피할 수 없는 손실은 두 에너지의 차이로 산정될 수 있다. 넷째, 누수를 포함하는 상태에서의 구조적 에너지 손실은 실제 상태의 유량과 위치수두의 곱으로 산정될 수 있다. 이 중에서 Gómez et al. (2018)에 의한 관리가 가능한 손실은 실제 상태의 유량과 실제 상태에서 압력수두의 최소치( $\text{Min}(h''_i)$ )의 곱으로 산정할 수 있으며, 피할 수 없는 손실은 두 에너지의 차이로 산정될 수 있다. 다섯째, 누수와 마찰에 의한 에너지 손실은 이상적 상태와 실제 상태의 에너지 차

**Table 7.** Energy components derived from node results

Components	Sub components	Values
Total energy supplied	The total energy supplied for unit time (Watts)	38027.65
	The total energy supplied for a year (Wh)	333122220.43
	The CO2 emission for a year (CO2e)	153036.35
Energy delivered to consumers	The energy delivered to consumers for unit time (Watts)	15959.23
	The energy delivered to consumers for a year (Wh)	139802893.25
	The CO2 emission for a year (CO2e)	64225.45
	The energy required by consumers for unit time (Watts)	1532.81
	The energy required by consumers for a year (Wh)	13427437.50
	The CO2 emission for a year (CO2e)	6168.56
	The excess energy supplied for unit time (Watts)	14426.42
	The excess energy supplied for a year (Wh)	126375455.75
	The CO2 emission for a year (CO2e)	58056.88
Structural energy loss excluding leaks	The structural energy loss excluding leaks for unit time (Watts)	3633.33
	The structural energy loss excluding leaks for a year (Wh)	31828000.24
	The CO2 emission for a year (CO2e)	14621.78
	The manageable structural energy loss excluding leaks for unit time (Watts)	6131.25
	The manageable structural energy loss excluding leaks for a year (Wh)	53709750
	The CO2 emission for a year (CO2e)	24674.26
	The unavoidable structural energy loss excluding leaks for unit time (Watts)	-2497.92
	The unavoidable structural energy loss excluding leaks for a year (Wh)	-21881749.76
Structural energy loss including leaks	The structural energy loss including leaks for unit time (Watts)	4194.13
	The structural energy loss including leaks for a year (Wh)	36740546.57
	The CO2 emission for a year (CO2e)	16878.61
	The manageable structural energy loss including leaks for unit time (Watts)	6575.3
	The manageable structural energy loss including leaks for a year (Wh)	57599636.81
	The CO2 emission for a year (CO2e)	26461.27
	The unavoidable structural energy loss including leaks for unit time (Watts)	-2381.17
	The unavoidable structural energy loss including leaks for a year (Wh)	-20859090.42
Leak and friction energy loss	The leak and friction energy loss for unit time (Watts)	6576.8
	The leak and friction energy loss for a year (Wh)	57612755.94
	The CO2 emission for a year (CO2e)	26467.3
	The leak energy loss for unit time (Watts)	-1234.95
	The leak energy loss for a year (Wh)	-10818188.24
	The CO2 emission for a year (CO2e)	-4969.88
	The friction energy loss for unit time (Watts)	7811.75
	The friction energy loss for a year (Wh)	68430944.18
	The CO2 emission for a year (CO2e)	31437.18

$(E_{ideal} - E_{real})$ 로 산정될 수 있으며, 누수에 의한 에너지 손실은 누수를 배제한 실제 상태와 실제 상태의 에너지 차( $E_{fric} -$

$E_{real})$ 로 산정될 수 있으며, 마찰에 의한 에너지 손실은 이상적 상태와 누수를 배제한 실제 상태의 에너지 차( $E_{ideal} - E_{fric}$ )로

**Table 8.** Energy components derived from link results

Components	Sub components	Values
Pipe energy loss for leak-excluded state	The pipe energy loss excluding leaks for unit time (Watts)	7811.75
	The pipe energy loss excluding leaks for a year (Wh)	68430952.39
	The CO2 emission for a year (CO2e)	31437.18
Pipe energy loss for leak-included state	The pipe energy loss including leaks for unit time (Watts)	13387.40
	The pipe energy loss including leaks for a year (Wh)	117273659.84
	The CO2 emission for a year (CO2e)	53875.52

산정될 수 있다.

링크의 수리적 결과 값으로부터 도출되는 에너지 요소를 설명하면, 먼저 누수를 배제하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실은 Table 6의 결과 값인 유량(flow), 단위손실수두(headloss) 및 관길이(length)를 각 링크별로 곱한 후 전체 관로에 대하여 합한다. 마찬가지로 누수를 포함하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실도 Table 6의 결과 값과 관길이를 각 링크별로 곱한 후 전체 관로에 대하여 합하는 과정을 통해 산정될 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 그동안의 상수관망의 운영관리에서 발생하는 에너지의 공급, 수요 및 손실을 관망해석 모형을 통해 산정하기 위한 정량적 분석기법을 제시하였다. 그동안의 많은 연구에도 불구하고 수도사업자들이 온실가스 저감을 위해 에너지 효율화를 위한 정책 및 실행방안을 수립함에 있어 지형기복의 영향, 누수 및 마찰손실의 복합적 영향으로 인해 실제 상수관망의 에너지 수지를 요소별로 분석하는 것이 도전적인 과제였으며, 본 연구를 통해 제시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지형의 기복, 누수 및 마찰손실의 유무에 따라 변화하는 유량, 압력수두 및 에너지를 5가지의 상수관망 상태(가설적 상태, 이상적 상태, 누수가 포함된 이상적 상태, 누수가 배제된 실제 상태, 실제 상태)에 대하여 수리 물리적 방정식을 도출하였으며, 이들 상태에 대한 도해적 설명을 제시하였다.
- 2) 5가지 상수관망 상태에 대한 분석을 통해 누수로 인한 유량 증가로 발생하는 추가적인 마찰에너지 손실, 마찰손실에 의해 발생하는 압력수두의 저하 및 이로 인해 저감되는 누수량에 대한 복합적 분석을 통해 누수와 마찰손실의 복합적 영향을 분석하였으며, 운영 상 에너지 손실의 변화가 구

조적인 에너지 손실의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

- 3) 단순에너지 관로에 대한 모의를 통해 제안된 상수관망 에너지 정량적 분석기법의 적용성을 평가하였으며, 관망해석 결과를 이용해 단위시간당 에너지(Watt), 연간 전력사용량(Wh), 연간 온실가스 배출량(CO2e)을 산정하였다. 즉, 절점의 수리적 결과 값으로부터 총 공급에너지, 사용자에게 공급되는 에너지, 누수를 배제하는 상태에서의 구조적 에너지 손실, 누수를 포함하는 상태에서의 구조적 에너지 손실, 누수와 마찰에 의한 에너지 손실을 구체적으로 산정하는 방법을 제시하였다. 또한, 링크의 수리적 결과 값으로부터 도출되는 누수를 배제하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실, 누수를 포함하는 상태에서의 관로마찰에 의한 에너지 손실 등 상수관망의 구성요소별 에너지 분석방법을 제시하였다.
- 4) 본 연구에서 개발된 기법은 기존의 연구들을 통해 제시되어 왔던 에너지 평가 지표들을 분석적 또는 수치적으로 계량화할 수 있는 방법론을 구체화할 것으로 기대되며, 향후 본 연구결과를 다양한 상수관망의 물리적 구성요소를 포함한 실제 상수관망에 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 관망해석의 확장기간 모의와 연계를 통해 시간대별로 변동하는 용수사용량 패턴을 감안한 에너지 절감형 상수도 시스템의 진단 및 운영에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Cabrera, E., Cabrera, E., Jr., Cobachoa, R., and Sorianoa, J. (2014). "Towards an energy labeling of pressurized water networks." *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 209-217.

- Cabrera, E., Pardo, M.A., Cobacho, R., and Cabrera, E. Jr. (2010). "Energy audit of water networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 136, No. 6, pp. 669-677.
- Carlson, S.W., and Walburger, A. (2007). *Energy index development for benchmarking water and wastewater utilities*. AWWA Research Foundation, Denver, CO, U.S.
- Gómez, E., Del Teso, R., Cabrera, E., Cabrera, E., Jr., and Soriano, J. (2018). "Labeling water transport efficiencies." *Water*, MDPI, Vol. 10, No. 935, pp. 1-16.
- Jeong, G., and Kang, D. (2017). "Applicability of reliability indices for water distribution networks." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 50, No. 7, pp. 441-453.
- Kim, S.-W., Kim, D., Choi, D. Y., and Kim, J. (2013). "A study on the method of energy evaluation in water supply networks." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 7, pp. 755-754.
- K-water (2021). *Carbon neutral roadmap of K-water until 2050*.
- Mamade, A., Loureiro, D., Alegre, H., and Covas, D. (2017) "A comprehensive and well tested energy balance for water supply systems." *Urban Water Journal*, Vol. 14, pp. 853-861.
- Pelli, T., and Hitz, H.U. (2000). "Energy indicators and savings in water supply." *Journal AWWA*, AWWA, Vol. 92, No. 6, pp. 55-67.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2: User's manual*. U.S. EPA, Cincinnati, OH, U.S.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2012). *Energy use assessments at water and wastewater systems guide*. Cincinnati, OH, U.S.
- Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation (WaCClim). (2018). *ECAM 2.2 methodology - Energy performance and carbon emissions assessment and monitoring tools*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) and International Water Association (IWA), Eschborn, Germany.