

상수관망의 에너지 평가기법에 관한 연구

A Study on the Method of Energy Evaluation in Water Supply Networks

김성원* / 김도환** / 최두용*** / 김주환****

Kim, Seong-Won / Kim, Dohwan / Choi, Doo Yong / Kim, Juhwan

Abstract

The systematic analysis and evaluation of required energy in the processes of drinking water production and supply have attracted considerable interest considering the need to overcome electricity shortage and control greenhouse gas emissions. On the basis of a review of existing research results, a practical method is developed in this study for evaluating energy in water supply networks. The proposed method can be applied to real water supply systems. A model based on the proposed method is developed by combining the hydraulic analysis results that are obtained using the EPANET2 software with a mathematical energy model on the MATLAB platform. It is suggested that performance indicators can evaluate the inherent efficiency of water supply facilities as well as their operational efficiency depending on the pipeline layout, pipe condition, and leakage level. The developed model is validated by applying it to virtual and real water supply systems. It is expected that the management of electric power demand on the peak time of water supply and the planning of an energy-efficient water supply system can be effectively achieved by the optimal management of energy by the proposed method in this study.

Keywords : water supply network, energy evaluation, performance indicator, leakage, operational efficiency

요 지

수돗물의 생산 및 공급과정에 소요되는 에너지에 대한 체계적인 분석 및 평가는 최근의 전력부족 사태와 온실가스 감축의 필요성에 따라 관심이 증가되고 있다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시한 결과에 대한 검토를 통하여 실용적으로 적용 가능한 에너지 분석기법 및 평가기법을 제시하였다. 본 연구에서는 EPANET2의 수치해석 결과를 이용하여 에너지를 평가할 수 있는 모형을 MATLAB 플랫폼 기반 하에서 개발하였다. 제안된 기법은 상수관망의 입지, 관로의 상태, 누수정도 등에 따라 시설물이 내재적으로 가지는 에너지 관리효율과 운영효율을 분리하여 평가할 수 있는 성능평가 지표를 제시하였다. 개발모형은 시험관망과 실제관망에 대하여 각각의 상수관망 구성요소에 대한 에너지 분석 및 평가결과를 제시함으로써 적용성 평가를 실시하였다. 본 연구의 결과는 상수관망 에너지 관리의 최적화를 도모함으로써 피크시간대의 전력수요 관리 및 에너지 절감형 상수도 시스템 계획 및 운영에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

* 한국수자원공사 K-water연구원, 연구원 (e-mail: kim_sungwon@kwater.or.kr)
Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

** 한국수자원공사 K-water연구원, 연구원 (e-mail: dhkim7441@kwater.or.kr)
Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

*** 교신저자, 한국수자원공사 K-water연구원, 책임연구원 (e-mail: dooyong@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, 462-1 Junmin-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-370, Korea

**** 한국수자원공사 K-water연구원, 수석연구원 (e-mail: juhwan@kwater.or.kr)
Chief Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

1. 서 론

상수관망은 수도물을 소비자에게 안정적으로 공급하기 위한 시설로써 도수, 송수, 배수 및 급수 시설이 유기적으로 연결되어 있는 관로의 집합체로 정의될 수 있다. 그동안 상수관망 시설계획의 적합도에 대한 평가는 수리적 신뢰도(hydraulic reliability)에 기반한 연구개발이 주로 수행되어져 왔으며(Jun et al., 2009), 운영관리 적합도에 대한 평가는 유수율(revenue water ratio) 또는 누수평가지표(infrastructure leakage index)로 대표되는 수량관리에 대한 연구개발이 이루어져 왔다(Koo et al., 2009). 상수관망의 적절한 계획 및 운영관리에 대한 필요성은 상수도 산업 운영관리 비용의 많은 부분을 차지하는 것이 수도물 공급과정에서 소요되는 전력비라는 것으로도 쉽게 설명될 수 있다. 특히 취수원이 원거리에 위치하며, 지형의 고저차가 현저한 우리나라의 경우 상수관망을 통한 수도물의 공급 및 배분에 많은 에너지를 사용하고 있는 현실이다. 그러나 지금까지 상수도 산업에서 에너지에 대한 인식은 펌프 효율만의 문제로 인식되어 왔으며, 상수관망 전체계에 대한 체계적인 에너지 평가 및 관리가 이루어지지 않았다. 최근의 전력 부족 사태와 온실가스 감축에 대한 필요성은 수도물의 생산 및 공급과정에서 에너지 소요량을 최소화하는데 대한 관심을 증가시키고 있다(USDE, 2006).

상수도 공급계통에 대한 체계적인 에너지 평가기법은 용수사용량과 압력을 에너지로 변환하는 과정을 통하여 Pelli and Hitz (2000)에 의해 처음으로 제안되었다. 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. 기간시설 지표는 시설물이 건설된 단계에서 고정적으로 가지고 있는 에너지를 나타내는 지표이며, 운영품질 지표는 수도사업자의 노력에 의하여 변동될 수 있는 효율성을 나타내는 지표이다. 또한 Alegre et al. (2006)은 국제수도협회(International Water Association, IWA) 매뉴얼을 통하여 앞서 제시한 바와 유사한 성능평가 지표(performance indicator)를 제시하였다. 최근에는 Cabrera et al. (2010)에 의하여 그동안 제시된 방법론을 보다 수학적 접근방법을 통하여 에너지를 산정하고 관련 지표를 평가할 수 있는 방법론이 제시되었다.

우리나라의 경우 환경부 상수도통계(MoE, 2012)에 따르면 2011년 현재 누수량은 629백만 m^3 , 누수율은 10.4%로, 그 동안의 유수율 제고사업으로 2001년 대비 누수량은 175백만 m^3 , 누수율은 3.5%가 감소되는 효과를 거두었다. 상수도 관망에서의 누수량 저감은 생산 및 공급에 소요되는 비용을 감소시키는 효과를 거두어야 하나, 수도물의 생산원가는 2011년 현재 813.4원/ m^3 로 2001년의 569.1원/ m^3 에 비하여 42.9% 상승되어, 같은 기간의 소비자 물가상승률 32.8%를 초과하는 기현상을 나타내고 있다. 따라서 상수도 운영관리 사업 전반에 소요되는 비용에 대한 검토, 특히 수도물의 생산 및 수도물 생산 및 공급과정에서 손실되는 에너지에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시된 상수관망 에너지 산정기법과 관련 평가지표에 대한 분석을 통하여 관망해석 프로그램과 연계하여 산정할 수 있는 모형을 제시하고자 한다. 상수관망에 흐르는 유량, 압력 등의 수리적 계산을 위한 프로그램은 범용적으로 사용되고 있는 EPANET2 (Rossman, 2000)를 이용하였으며, 수리적 계산결과에 기반한 에너지 산정은 EPANET2에서 제공하는 Toolkit을 이용하여 수치계산 플랫폼(platform)인 MATLAB과 연계하였다. 개발된 상수관망 에너지 평가 모형은 시험관망에 대하여 적용성을 평가함으로써 관망의 구성 요소별 에너지 및 관련지표를 산정하였다. 또한 국내 SC지역의 송수관로 계통에 대한 실제 적용을 통하여 관망에너지의 분석 기간(일단위 또는 연단위) 및 누수발생 유무에 따른 에너지 변화와 관련지표에 대한 검토를 실시하였다.

2. 상수관망의 에너지 분석 및 평가기법

2.1 관망 에너지 구성요소

상수관망을 구성하는 물리적 요소는 크게 저수지(reservoir), 펌프(pump), 탱크(tank), 절점(junction), 관로(pipe), 밸브(valve)의 6개 요소로 구성된다. 에너지 관점에서 저수지 및 펌프는 상수도 공급을 위하여 위치 또는 전기적 에너지를 공급(supply)하는 요소로, 용수수요 절점 및 관로는 에너지를 소모(demand)하는 요소로 구분될 수 있다. 관로의 중간에 설치되어 수도물 사용량의 시간대별 변동을 평활화하는 기능을 하는 탱크는 유출입 방향에 따라 에너지의 공급과 소모 기능을 동시에 가지고 있다. 또한 밸브 등 관로 상에 설치된 부속물은 미소손실을 발생시키며 관로손

실에 포함하여 에너지를 산정할 수 있다. 그러나 실제의 관망에서는 관로계통 중간의 누수로 인하여 에너지가 소모되며, 이를 관망 에너지 구성요소로 포함하여야 한다.

따라서 상수관망 에너지는 공급에너지(E_{input})와 소모 에너지(E_{output})에 따라 구성 요소별로 다음의 에너지 보존법칙이 성립된다.

$$E_R + E_P = E_F + E_L + E_J + \Delta E_T \quad (1)$$

여기서, E_R 는 저수지에 의하여 공급되는 에너지, E_P 는 펌프에 의하여 공급되는 에너지, E_F 는 관로의 마찰(미소손실 포함)에 의해 소모되는 에너지, E_L 는 누수에 의하여 소모되는 에너지, E_J 는 용수수요 절점에 의하여 소모되는 에너지, ΔE_T 는 탱크에 의하여 소모 또는 공급되는 에너지이다. Eq. (1)은 단위시간당 에너지 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma Q_R H_R + \gamma Q_P H_P = \\ \gamma Q_F H_F + \gamma Q_L H_L + \gamma Q_J H_J + \Delta \gamma Q_T H_T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, γ 는 물의 단위중량을 나타낸다. 좌변의 첫째 항은 저수지에 의하여 관로계통에 공급되는 유량(Q_R)과 동수두(H_R), 둘째 항은 펌프에 의하여 관로계통에 공급되는 유효토출량(Q_P)과 유효양정(H_P)을 나타낸다. 우변의 첫째 항은 관로유량(Q_F)과 손실수두(H_F)를 나타내며, 손실수두는 유량의 함수로 표시되는 비선형 방정식인 Darcy-Weisbach식 또는 Hazen-Williams식으로 계산된다. 둘째 항은 절점에서의 누수량(Q_L)과 누수지점의 동수두(H_L), 셋째 항은 절점에서의 용수수요량(Q_J)과 동수두(H_J), 넷째 항은 탱크로 유출입되는 유량($\pm Q_T$)과 동수두(H_T)를 나타낸다.

상수관망은 다수의 물리적 요소로 구성되어 있으므로 실제 관망에 대한 모의는 각 요소들을 합산하여 에너지를 산정하여야 한다. 따라서 저수지, 펌프, 관로, 절점 및 탱크의 개수를 각각 NR , NP , NF , NJ , 및 NT 라 하면, Eq. (2)의 단위시간당 에너지 방정식은 다음과 같이 구성요소들의 합으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \gamma \sum_{i=1}^{NR} Q_{Ri} H_{Ri} + \gamma \sum_{j=1}^{NP} Q_{Pj} H_{Pj} = \gamma \sum_{k=1}^{NF} Q_{Fk} H_{Fk} \\ + \gamma \sum_{l=1}^{NJ} Q_{Ll} H_{Ll} + \gamma \sum_{j=1}^{NJ} Q_{Jl} H_{Jl} + \Delta \gamma \sum_{m=1}^{NT} Q_{Tm} H_{Tm} \end{aligned} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 누수에 의한 에너지 손실은 관로계통 임의

의 구간에서 발생되나, 수치해석 모형에서 누수에 대한 모의는 용수수요 절점에서 압력에 의존하는(pressure-driven) 수요로서 해석한다. 따라서 위 식의 누수발생 절점 수는 용수수요 절점과 동일하게 사용되며, 누수가 발생되지 않는 절점은 유량계수가 0으로 설정된다. 상수관망에 대한 에너지 분석은 특정한 시간이 아니라 일정기간(일단위 또는 연단위)에 공급 또는 소모되는 에너지 총량에 대한 분석을 필요로 한다. 용수수요량의 시간적 변화에 따라 변화하는 수리적 조건을 반영하기 위하여 관망 해석에서는 확장기간모의(extended period simulation) 기법을 이용하여 유량 및 압력의 시간적 변화를 모의한다. 따라서 Eq. (3)을 분석기간($t_1 \sim t_2$)에 대하여 일정시간 간격(Δt)으로 적분한 에너지 총량에 대한 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \gamma \sum_{i=1}^R \left[\sum_{t=1}^{NR} Q_{Ri}(t) H_{Ri}(t) \right] \Delta t + \gamma \sum_{j=1}^P \left[\sum_{t=1}^{NP} Q_{Pj}(t) H_{Pj}(t) \right] \Delta t = \\ \gamma \sum_{k=1}^F \left[\sum_{t=1}^{NF} Q_{Fk}(t) H_{Fk}(t) \right] \Delta t + \gamma \sum_{l=1}^L \left[\sum_{t=1}^{NL} Q_{Ll}(t) H_{Ll}(t) \right] \Delta t + \\ \gamma \sum_{j=1}^J \left[\sum_{t=1}^{NJ} Q_{Jj}(t) H_{Jj}(t) \right] \Delta t + \Delta \gamma \sum_{m=1}^T \left[\sum_{t=1}^{NT} Q_{Tm}(t) H_{Tm}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 관망 에너지 평가지표

상수관망의 에너지 평가에서 우선적으로 도입하여야 할 지표는 각 에너지 구성요소가 전체 공급 또는 소모 에너지에서 차지하는 구성 비율을 나타내는 것이다. 산술적인 계산에 의해 값이 정해지는 다른 에너지 구성요소와 달리 탱크에 의해 소모 또는 공급되는 에너지와 누수에 의해 소모되는 에너지는 세부적인 검토가 요구된다. 또한 앞서 언급한 기간시설 지표와 운영품질 지표를 구분하는데 있어 기술적인 검토가 요구되므로 본 절에서는 이에 대하여 검토를 통하여 관로 에너지 평가지표를 제시하고자 한다.

2.2.1 장단기 모의에 의한 탱크에너지 평가

상수도 사업의 운영효율에 대한 평가는 일반적으로 연단위를 기본으로 수행하므로, 상수관망에 대한 에너지의 평가를 위해서는 1년에 대한 장기적인 모의가 수행되어야 한다. 따라서 탱크의 유출입에 따른 에너지 손실을 무시하면 장기적인(long term) 모의에서 탱크에 의하여 소모 또는 공급되는 에너지의 합은 "0"이 된다. 그러나 탱크는 단기적인(short term) 용수수요 변동에 대한 완충기능을 통하여 수량 및 수압 관리의 평활화에 중요한 역할을 수행한다. 따라서 1일 단위의 단기적인 모의를 통하여

탱크가 가지는 에너지의 완충기능을 평가하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Cabrera et al. (2010)가 제시한 바와 같이 1년에 걸친 장기적인 모의를 1시간 단위로 수행하고, 1일에 걸친 단기적인 모의를 1분 단위로 모의함으로써 탱크가 가지는 에너지 분담기능을 평가하고자 하였다.

2.2.2 관로손실을 고려한 누수에너지 평가

상수관망의 에너지 방정식인 Eq. (1)에서 누수에 의하여 소모되는 에너지(E_L)는 절점에서의 누수량만을 고려한 것이다. 그러나 누수로 인하여 상수관망에 더 많은 부하의 유량이 공급되어야 하며 이로 인하여 관로에 추가적인 마찰손실을 발생시킨다. 따라서 관로의 마찰손실에 의하여 소모되는 에너지(E_F)는 용수수요량의 이송에 따라 손실되는 에너지($E_{F,j}$)와 누수량의 이송에 따라 손실되는 에너지($E_{F,L}$)로 구분될 수 있다. 누수에 의하여 소모되는 총 에너지($E_{L,total}$)는 다음의 식으로 계산된다.

$$E_{L,total} = E_L + E_{F,L} \quad (5)$$

Eq. (3)에서 $E_{F,L}$ 의 계산은 누수를 포함한 실제적(real) 모의에서의 마찰손실 에너지(E_F)에서 누수를 포함하지 않은 이상적(ideal) 모의에서의 마찰손실 에너지($E_{F,j}$)를 공제한 값으로 산정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 실제적 상태와 이상적 상태에 대한 모의를 통하여 관로손실을 고려한 누수에너지 평가를 실시하고자 하였다.

2.2.3 기간시설 지표와 운영품질 지표의 구분

상수관망 에너지 산정 및 평가에 관한 기존의 연구는 기간시설 지표와 운영품질 지표를 구분하는데 중점을 두어 왔다(Pelli and Hitz, 2000; Alegre et al., 2006; Cabrera et al., 2010). 다시 말하면 수도사업자의 운영품질 효율을 평가하는데 있어 현안은 상수관망의 지형적 여건에 기인하는 서로 다른 용수공급시스템의 구조적인 차이를 어떻게 배제하는가에서 출발한다. 예를 들어 급수지역에 비해 높은 곳에 위치한 수원지에서 공급하는 시스템에서는 펌프 등의 에너지를 추가적으로 사용하지 않고 수도물을 공급할 수 있다. 반면에 지하수를 수원으로 하여 평활한 지형에 수도물을 공급하는 경우에는 펌프를 이용한 추가적인 에너지의 공급 없이는 용수의 공급이 불가능하다. 이렇게 지형적 여건에 따라 관로시스템이 고정적으로 가지고 있는 에너지 공급 및 소모량을 기간시설 지표로, 수도사업자의 운영관리 효율성에 따라 변동될 수 있는 에너지 공급 및 소모량을 운영품질 지표로 구분하는 방법론에 대

한 그간의 연구결과는 공통적으로 최소평면 소모에너지($E_{min,flat}$)와 최소 소모에너지(E_{min})의 개념을 도입하였다. 최소평면 소모에너지($E_{min,flat}$)는 지형의 굴곡이 없는 평면지형에서 누수와 마찰에 의한 에너지 소모가 없는 상태에서의 에너지는 절점 압력수두의 최소치(예를 들어 15 m)와 용수수요량의 곱으로 정의된다. 둘째로, 최소 소모 에너지는 상수관망의 지형적 기복은 실제관망과 동일하나 누수와 마찰에 의한 에너지 소모가 없는 상태에서의 에너지는 절점 동수두의 최소치(예를 들어 15 m + 절점별 지반고)와 용수수요량의 곱으로 정의된다. 이 때 절점별 지반고는 절점의 지반고가 최소가 되는 지점을 기준점(지반고 "0")으로 재설정 하여야 한다.

2.2.4 관망 에너지 평가지표

이상의 논의에서 언급된 사항을 반영하여 상수관망 에너지 평가지표를 평가하기 위해서는 ① 장기와 단기를 구분하여 모의, ② 누수의 유무를 구분하여 모의하는 것이 필요하다. 이렇게 산정한 구성요소별 에너지는 기본 평가지표(basic indicator)를 산정하는데 이용될 수 있다(Table 1). 예를 들어 전체에너지 공급량(E_{input})에 대한 펌프에너지 공급량(E_p)의 비는 전기 에너지에 대한 부담률을 나타내어 상수관망의 지형적 조건에 대한 평가가 이루어질 수 있다. 이외에도 단기 모의 시 탱크의 에너지 부담률에 대한 평가는 전체에너지 공급량(E_{input})에 대한 탱크에너지 유출입량(ΔE_T)의 비로 나타낼 수 있다. 기본 평가지표 외에 Table 1의 응용 평가지표(applied indicator)를 통하여 상수관망이 내재적으로 가지고 있는 에너지 관리효율과 운영관리 수준에 의하여 변동될 수 있는 효율을 분리하여 평가할 수 있다. 먼저 기간시설 지표(infrastructure indicator, A_1)는 수용가 지형의 굴곡, 관로의 누수 및 마찰손실이 없는 이상적인 조건에 대한 수용가 지형의 굴곡으로 인한 관리효율의 난이도를 나타내는 지표로서 큰 값을 가질수록 관리의 난이도가 증가한다. 운영품질 지표(operational quality indicator, A_2)는 수용가 절점의 평면적 산포 정도(예를 들어, 산포도가 클수록 관로의 연장이 길어짐), 관로의 마찰손실 및 누수를 포함하는 복합적 운영품질을 나타내며 적은 값을 가질수록 운영관리의 품질이 높아진다. 마지막으로 총누수관리 지표(total leakage management indicator, A_3)는 누수에너지 지표(leakage energy indicator, B_4)에서 반영되지 않은 누수에 의한 부가적 마찰손실을 포함하여 운영효율을 평가한다.

Table 1. Performance Indicator to Evaluate Energy in Water Supply Networks

Indicator		Equation	Remarks
Basic indicator	Gravitational energy indicator (B_1)	E_R/E_{input}	The ratio of total input energy to gravitational energy
	Pumping energy indicator (B_2)	E_P/E_{input}	The ratio of input energy to pumping energy
	Frictional energy indicator (B_3)	E_F/E_{input}	The ratio of input energy to frictional energy
	Leakage energy indicator (B_4)	E_L/E_{input}	The ratio of input energy to leakage energy
	Demand energy indicator (B_5)	E_J/E_{input}	The ratio of input energy to demand energy
	Storage energy indicator (B_6)	$\Delta E_T/E_{input}$	The ratio of input energy to tank energy that is only effective for short-term simulation
Applied indicator	Infrastructure indicator (A_1)	$E_{min}/E_{min,flat}$	An indicator to represent the difficulty level of energy management according to geographic elevation that is one in ideal case.
	Operational quality indicator (A_2)	E_{input}/E_{min}	An indicator to represent compound operational quality including horizontal spreading, frictional loss, and leakage.
	Total leakage management indicator (A_3)	$E_{L,total}/E_{input}$	An indicator to represent the total energy loss induced by leakage that is zero in ideal case.

3. 에너지 평가모형의 구축

상수관망의 에너지 평가모형의 구축은 관망 수리해석 결과를 기초자료로 이용하여야 한다. 본 연구에서는 범용적 관망해석 모형인 EPANET2를 이용하여 관망해석 결과를 취득하고자 하였다. EPANET2는 펌프에 의한 에너지 소모량 외에 본 연구에서 필요로 하는 에너지 요소성분에 대한 계산 기능을 제공하지 않는다, 따라서 본 연구에서는 EPANET2에서 다른 프로그램과 연계를 위하여 제공하는 Toolkit 기능을 이용하여 범용적 수치해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 MATLAB과 연계하였다. 에너지 분석 및 평가를 위한 연계 모형의 수행절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 관망에 대한 입력자료가 구비되면 MATLAB 내에서 입력자료와 동적 연결 라이브러리(dynamic link library)를 주기억장치에 읽어 들인다. 에너지 평가가 관로상 최저절점의 표고를 기준선으로 설정하였을 때에 대한 상대적인 평가가 이루어 질수 있도록 고정수두 절점(fixed grid node)를 포함하는 모든 절점의 표고를 조정한다. 예를 들어 최저절점의 표고가 10m일 경우 해당 절점의 표고를 0으로 설정하고, 다른 절점들의 원래 표고값에 -10을 공제한다. 에너지 평가를 위한 모의는 모의기간에 따라 단기와 장기로, 누수의 발생 유무에 이상관망 및 실제관망을 구분하여 네 가지 경우에 대한 분석을 실시한다.

장기모의(365일) 시에는 15분을 모의 시간간격으로, 단기 모의(1일) 시에는 1분을 모의시간 간격으로 설정한다. 누수의 발생 특성 및 정도에 따라 에미터(emitter)의 압력지수 (pressure exponent) α 와 유량계수(discharge coefficient) C 를 다음의 식에 따라 각각 절점에 설정한다.

$$Q_L = C(2gH_L)^\alpha \tag{6}$$

여기서, g 는 중력가속도이다. 누수가 발생되지 않는 절점의 누수량은 0이 되어, 전체적인 에너지 소모량에 부과되지 않는다. 압력지수에 대한 기존의 실험적 연구결과에 따르면, 압력의 변화에 따라 누수공 면적의 변화가 수반되지 않는 금속관의 경우는 0.5, 누수공 면적이 변화하는 비금속관의 경우는 1.0을 사용하도록 권장된다(Thornton, 2003; Walski et al., 2006). 유량계수는 각 절점에 할당된 누수량(Q_L)과 절점별 평균 압력수두(H_L)의 측정값을 이용하여 계산하며, 압력 측정치가 없는 경우에는 모의값을 이용한다. 변경된 관망해석 조건은 서브모듈인 getcontant.m과 setconstant.m에 의하여 메모리 내에서 각각의 변수에 할당되어 EPANET2를 이용한 관망해석을 수행한다. 모의기간(long term, short term) 및 누수발생 유무(ideal, real)에 따라 4가지 모의조건에 대하여 에너지 공급 및 소모량을 결정할 후, 모든 시뮬레이션이 완료 된 후에 앞서 기술된 6개의 기본평가 지표와 3개의 응용평가 지표를 계산한다.

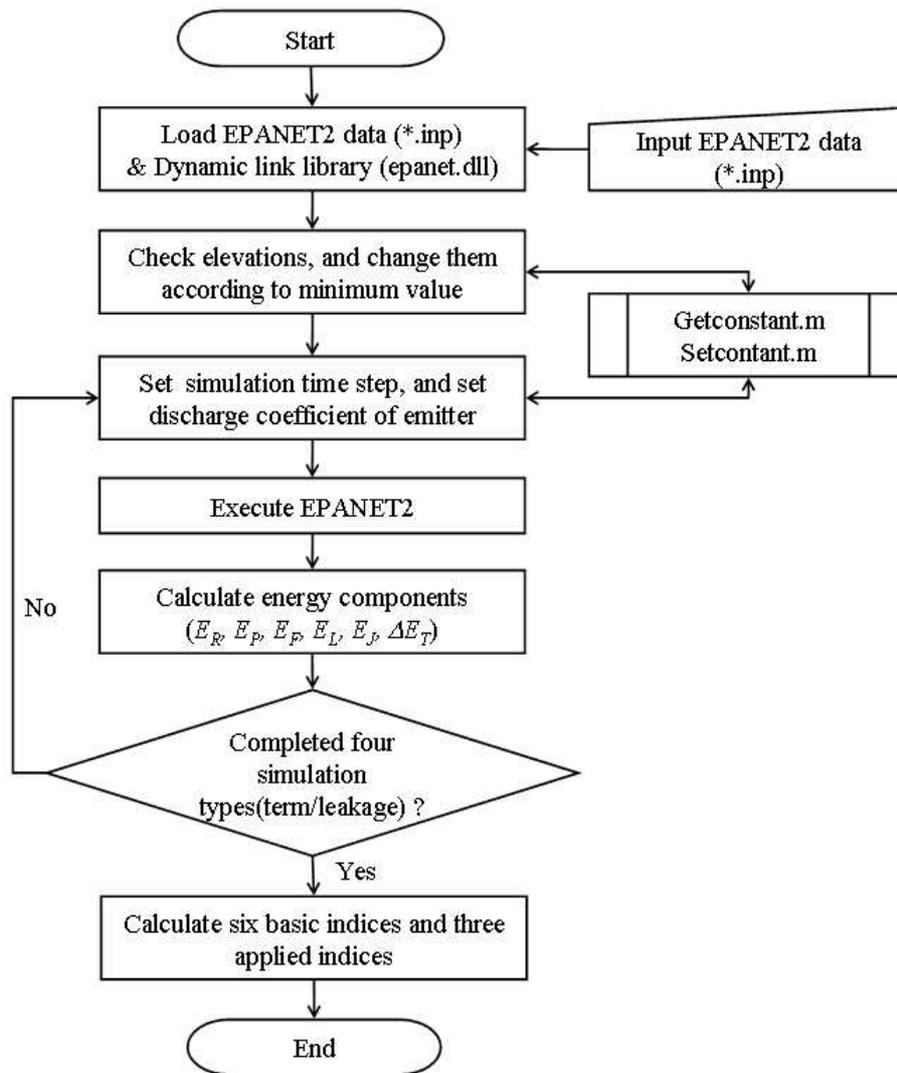


Fig. 1. Flowchart to Calculate Energy Indices of Water Supply Networks

4. 에너지 평가 기법의 적용 및 결과

본 연구에서 제안된 기법은 먼저 EPANET2의 시험관망에 대하여 적용성을 평가한 후, 국내 SC지역의 송수관로 계통에 대한 에너지 요소 분석 및 평가를 실시하였다. 관망의 에너지 평가를 위한 모의는 모의기간에 따라 단기(모의시간 1일, 시간간격 1 분)와 장기(모의시간 365일, 시간간격 15분)를 구분하고, 누수의 발생 유무에 이상관망 및 실제관망을 구분하여 네 가지 경우에 대한 분석을 실시하였다.

4.1 시험관망에 대한 모의

본 시험관망은 EPANET2에서 제공하는 예제 net1으로서 관망의 물리적 구성요소인 저수지, 펌프 및 탱크가 모

두 포함되어 있는 격자형으로 상수관망의 형태는 Fig. 2와 같다. 본 관망은 12개의 관로, 9개의 용수수요 절점으로 구성되어 있으며, 관로의 길이는 200~10,530 ft에 분포되어 있으며, 관경은 6~18 in로 구성되어 있다. 일단위 용수수요 패턴은 0.4~1.6 사이에서 2시간마다 변동되는 분포를 가지고 있다. 본 예제가 기본적으로 가지고 있는 속성 외에 누수의 모의를 위한 압력계수 $\alpha = 0.5$ 로 설정하였으며, 각 절점별 에미터 유량계수 C 는 약 25%의 누수발생 모의를 가정하여 Table 2와 같이 설정하였다.

본 예제의 에너지 분석결과는 Table 3에 나타내었으며, 장기모의 결과를 이용한 에너지 평가지표는 Table 4에 나타내었다. 에너지 수치분석 결과에 따르면 본 상수도 시스템은 펌프에 의한 에너지 공급이 64.6~65.1%로 자연적 여건에 의하여 용수공급 에너지를 확보하기에는 어려움

이 있음을 확인할 수 있었다. 탱크의 에너지 부담률은 장기 모의 시 관망해석 상의 오차를 무시하면 "0"으로 수렴하므로, 단기모의 시 부담률을 검토하는 것이 필요하며 Table 4에 괄호로 나타내었다. 본 관망 시스템에서 탱크의 에너지 부담률은 0.2~4.3%로 적은 것으로 나타났으며, 이는 탱크의 전력 피크시간에 대한 완충역할을 기대할 수 없다

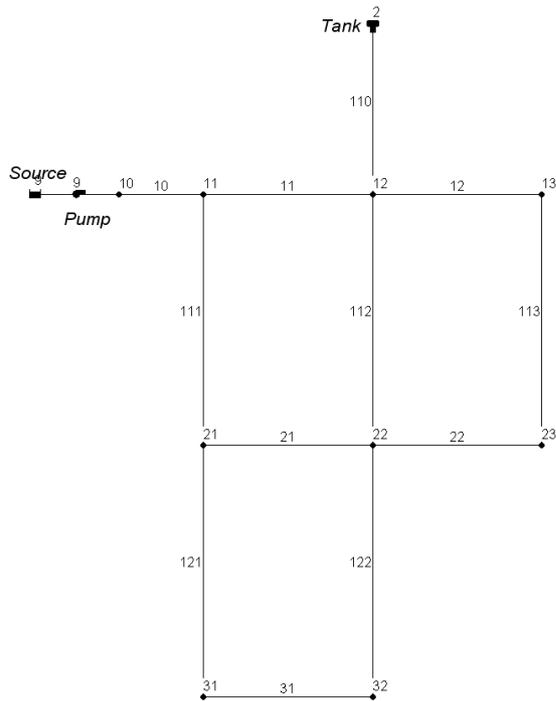


Fig. 2. Schematic Diagram of Test Pipe Network

는 것을 의미한다. 기간시설 지표(A_1)는 1.194로서 용수 수요 절점의 고저차가 거의 없는 지형으로 시설관리의 난이도가 적은 것으로 평가되었다. 누수를 제외한 운영품질 지표(A_2)는 5.381이며, 누수를 포함한 운영품질 지표(A_3)는 7.283으로서 과다한 양의 누수(약 25%)로 인한 운영품질 지표의 상승을 확인할 수 있었다. 총 누수관리 지표(A_3)는 0.284로서 누수에너지 지표(B_1) 0.244에 비하여 0.4가 높아 누수량을 추가공급 함으로써 관로상에 추가적으로 발생하는 에너지의 손실은 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 많은 누수량에도 불구하고 시험관망의 관로길이가 짧아 마찰손실이 전체 에너지 소모량에서 적은 비중을 차지하는 것으로 설명될 수 있다.

4.2 국내 SC지역의 송수관로 계통에 대한 모의

국내 SC지역의 송수관로 계통은 수지상형(branch-type)을 기본으로 하고 있으나, 관로계통의 복선화 및 비상연계를 통하여 상호 간의 연계가 가능한 복합형(compound-type) 관로형상을 가지고 있다(Fig. 3). 관망해석을 위한 SC지역 관로계통은 88개의 관로, 89개의 용수수요 절점, 2개의 저수지(정수장의 정수지), 2개의 탱크(배수지), 12개의 펌프로 구성되어 있다. 관로의 직경은 200~1,350 mm에 분포되어 있으며, 관로의 마찰손실계수(Hazen-Williams의 C_{HW})는 현장의 관로 통수능을 감안하여 대구경 수도관에 적합한 130~140의 값을 사용하였다. 용수사용량 패턴은 각 절점의 수용가 특성에 적합하도록 추정치에 근거하여 조사하여야 하나, 유량추정 자료 취득의 한계로 인하여

Table 2. Discharge Coefficient of Emitter for Test Pipe Network

Node no.	10	11	12	13	21	22	23	31	32
Coefficient	-	5.0	4.5	3.8	4.7	7.0	5.2	4.6	4.0

Table 3. Energy Balance of Test Pipe Network

Energy		Ideal network		Real network	
		Short term (kWh/day)	Long term (MWh/year)	Short term (kWh/day)	Long term (MWh/year)
E_{input}	E_R	522.3	200.6	755.7	275.0
	E_P	1,000.8	373.7	1,415.1	502.4
E_{output}	E_F	157.2	62.8	244.2	93.7
	E_L	-	-	562.9	189.9
	E_J	1,430.7	509.6	1,368.4	494.9
	ΔE_T	-64.9	1.8	-4.7	-1.2

SC지역 전체 용수사용량 측정치에 근거하여 작성한 Table 5의 시간대별 패턴자료를 이용하였다. 누수의 모의를 위한 압력지수는 금속관임을 감안하여 $\alpha = 0.5$ 으로 설정하였다. 또한 유량계수 C 는 해당지역의 누수율이 평균적으로 9%임을 감안하여, 각 절점별로 누수량 $Q_L = Q_j \times [9 / (100 - 9)]$ ()을 산정한 후 압력수두의 시간적 평균 모의치와 결합하여 Eq. (6)에 의하여 0.03~41.0의 값을 할당하였다.

본 실제관망에 대한 에너지 수지분석 결과는 Table 6에, 장기모의 결과에 기초한 에너지 평가지표는 Table 7에 나타내었다. SC 송수관로 계통은 펌프에 의한 에너지 공급이 73.5~73.8%로 중력에너지 이용률에 비하여 현저하게 커서 에너지 소모적인 관로시스템임을 확인할 수 있었다. 단기 모의시 탱크의 에너지 부담률은 3.6~11.4%로 나타나, 탱크가 전력 피크에 대한 일정부분의 완충역할을 할

Table 4. Energy Indicator of Test Pipe Network

Indicator	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	A_1	A_2	A_3
Ideal network	0.349	0.651	0.109	-	0.888	0.003 (-0.043)	1.194	5.381	-
Real network	0.354	0.646	0.121	0.244	0.637	-0.002 (-0.002)	-	7.283	0.284

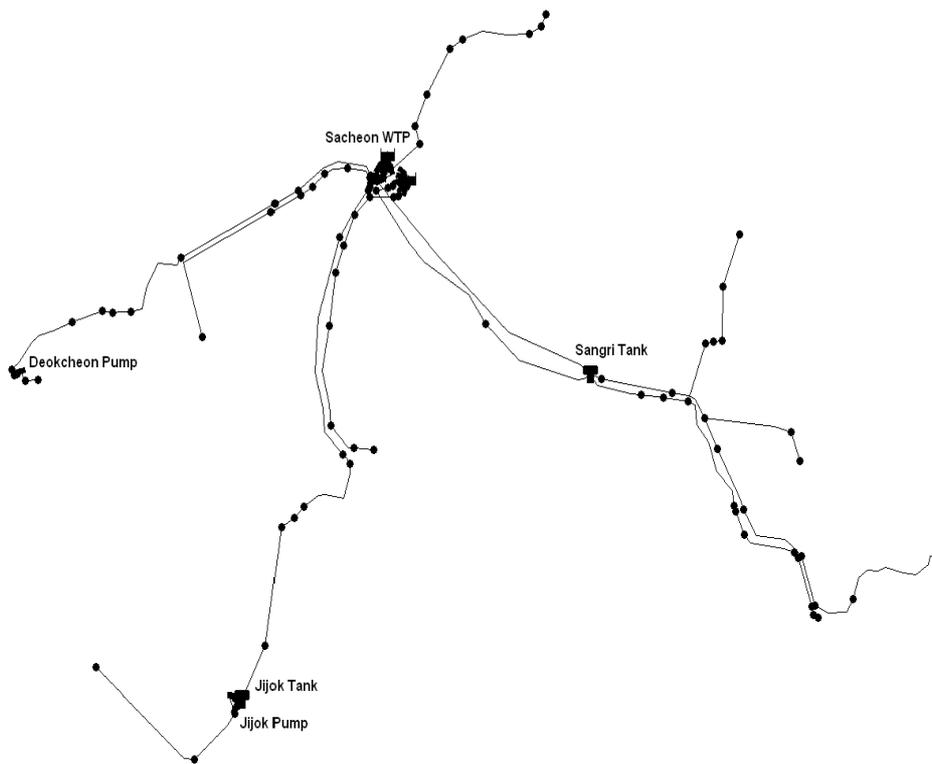


Fig. 3. Schematic Diagram of SC Water Supply Network

Table 5. Demand Pattern of SC Water Supply Network

Time (hr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficient	0.67	0.56	0.50	0.48	0.47	0.55	0.62	0.95	1.37	1.39	1.24	1.27
Time (hr)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coefficient	1.27	1.12	1.18	1.01	0.98	1.07	1.13	1.43	1.40	1.35	1.11	0.88

Table 6. Energy Balance of SC Water Supply Network

Energy		Ideal network		Real network	
		Short term (kWh/day)	Long term (MWh/year)	Short term (kWh/day)	Long term (MWh/year)
E_{input}	E_R	17,026.0	7,405.4	21,406.1	7,810.0
	E_P	46,790.5	20,814.4	59,390.0	21,661.0
E_{output}	E_F	13,397.1	7,112.2	18,540.2	7,636.8
	E_L	-	-	6,201.7	2,550.5
	E_J	48,119.4	21,108.6	46,847.2	19,284.9
	ΔE_T	2,300.0	-0.49	9,205.1	-1.38

Table 7. Energy Indicator of SC Water Supply Network

Indicator	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	A_1	A_2	A_3
Ideal network	0.262	0.738	0.252	-	0.748	0.000 (0.036)	3.689	3.133	-
Real network	0.265	0.735	0.259	0.087	0.654	0.000 (0.114)	-	3.272	0.104

수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 산정한 탱크의 분담률은 분석시간(예를 들어 6 hr, 12 hr, 24 hr 등)에 따라 달라질 수 있으며, 이용 가능한 최대 분담률은 분석시간에 대한 고려가 필요하다. 기간시설 지표(A_1)는 3.689로서 시설의 고저차로 인한 관리의 난이도가 상당한 것으로 평가되었다. 누수를 제외한 운영품질 지표(A_2)는 3.133이며, 누수를 포함한 운영품질 지표(A_2)는 3.272로서 소량의 누수(약 9%)로 인하여 운영품질 지표가 적게 상승하였음을 확인할 수 있었다. 총 누수관리 지표(A_3)는 0.104로서 누수에너지 지표(B_4) 0.087에 비하여 0.017이 높아 누수량을 추가 공급 함으로써 관로상에 발생하는 에너지의 추가손실이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 그동안의 상수관망 운영관리 효율평가에 대한 연구가 수량관리 측면에 집중되어 온 것과는 달리, 에너지 분석 및 평가기법을 도입함으로써 효율적인 상수관망의 계획 및 운영에 필요한 방법론을 제시하였고 대상관망에 적용하여 제안된 기법에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상수관망 해석에 에너지 방정식에 근거한 분석 및 평가기법의 도입을 통하여 용수공급시스템의 구성 요소별 에너지의 공급 및 소모 기여율을 산정할 수

있도록 하였다. 또한 상수관망 입지의 지형적 조건, 관로의 상태 및 누수 정도에 따라 시설물 관리효율과 운영효율을 분리하여 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다.

- 2) 에너지 분석 및 평가와 관련된 기존 관망해석 모형의 한계를 극복하기 위하여, 에너지 요소성분 산정에 필요한 조건을 범용적 수치해석 프로그램인 MATLAB을 활용하여 구축하였고, 관망해석 프로그램인 EPANET2와의 연계방안을 제시하였다.
- 3) 제안된 에너지 분석 및 평가기법의 EPANET2의 예제인 시험관망과 국내 SC지역의 송수관로 계통에 대하여 적용성 평가를 실시하였다. 시험관망의 경우 펌프에 의한 에너지 공급률이 64.6~65.1%로 높은 편이며, 탱크에 의한 단기적 에너지 분담률이 4.3%이하로 전력수요관리를 위하여 탱크의 규모를 증가시키는 것이 바람직할 것으로 나타났다. 국내 SC지역 송수관망의 경우 펌프에 의한 에너지 공급률이 73.5~73.8%로 용수공급 측면에서 수도시설의 입지 여건이 열악한 것으로 나타났으며, 탱크에 의한 단기적 에너지 분담률은 11.4%에 이르는 것으로 나타났다. 두 계통에 대한 적용결과에서 공통적으로 관로계통의 길이가 짧아 누수량을 추가 공급함으로써 발생하는 관로상 마찰손실은 적은 것으로 평가되었다.
- 4) 본 연구에서 개발된 기법은 수도물 공급계통에서 소

요되는 에너지에 대한 체계적인 분석을 통하여 에너지 사용량의 최소화를 도모할 수 있을 것으로 판단되며, 피크시간 대의 전력 수요 관리방안 수립, 최적화 기법을 이용한 에너지 절감형 상수도시스템 계획 및 운영 등에 활용될 수 있어 이에 대한 추가적인 연구가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(과제번호 : GT-11-G-02-001 -6)”의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E. Jr., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., and Parena, R. (2006). *Performance indicators for water supply service*. IWA Publishing, London.

Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., and Cabrera, E. Jr. (2010). “Energy Audit of Water Networks.” *J. of Water Res. Plan. Mgmt.*, ASCE, Vol. 136, No. 6, pp. 669-677.

Jun, H.D., Kim, S.H., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2009). “Evaluation of the reliability improvement of a water distribution system by changing pipe.” *J. of Korea Water Res. Assoc.*, KWRA, Vol. 42, No. 6, pp. 505-511.

Koo, J.Y., Jang, K.H., and Kim, M.C. (2009). “Study on the characteristics of night flow components for leakage management in district metered area.” *J. of Korean Soc. of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 23, No. 6, pp. 871-879.

Ministry of Environment (MoE)-Korea (2012). *2011 Statistics of Waterworks*. Seoul.

Pelli, T., and Hitz, H.U. (2000). “Energy indicators and savings in water supply.” *J. Amer. Water Works Assoc.*, AWWA, Vol. 92, No. 6, pp. 55-67.

Rossman, L.A. (2000). *EPANET2: User’s manual*. U.S. EPA, Cincinnati.

Thronton, J. (2003). “Managing leakage by managing pressure: A practical approach.” *Water21, October issue*, pp. 33-34.

U.S. Department of Energy (USDE). (2006). *Energy demands on water resources: Rep. to congress on the interdependency of energy and water*. Washington, D.C.

Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E.T., Weir, M., and Whitman, B. (2006). “Modeling leakage reduction through pressure control.” *J. Amer. Water Works Assoc.*, AWWA, Vol. 94, No. 4, pp. 147-155.

논문번호: 13-036	접수: 2013.03.14
수정일자: 2013.04.21/04.29	심사완료: 2013.04.29