



## Applicability of reliability indices for water distribution networks

Jeong, Gimoon<sup>a</sup> · Kang, Doosun<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

Paper number: 17-029

Received: 17 March 2017; Revised: 18 May 2017 / 22 May 2017; Accepted: 22 May 2017

### Abstract

Water distribution networks (WDNs) supply drinking water to end users by maintaining sufficient water pressure for reliable water supply in normal and abnormal conditions. To design and operate WDNs in efficient way, it is required to quantify water supply ability of the network. Various reliability indices have been developed and applied in this field. Most of the reliability indices are calculated based on the energy within a network; that is, the total energy entered the network, the energy dissipated through water supply process, and the energy finally supplied at the nodes, etc. This study explains the energy composition in WDNs and introduces three well-known reliability indices developed based on the energy composition of the network. The three indices were applied to a study network under various demand loading scenarios that could occur in real-life operation practices. This study aimed to investigate the applicability of the reliability indices under abnormal scenarios and proposed to illustrate the spatial distribution of the system reliability in more intuitive way for proper responses to the abnormal situations.

**Keywords:** Energy flow quantification, Reliability index, Water distribution network

## 공급부하 시나리오에 따른 상수관망 신뢰도 지수의 적용성 분석

정기문<sup>a</sup> · 강두선<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>경희대학교 사회기반시스템공학과

### 요 지

상수관망 시스템은 다수의 이용자에게 용수를 공급하기 위한 사회기반시설물로서, 적절한 수압을 유지하고 안정적으로 용수를 공급할 수 있어야 한다. 따라서 안정적인 설계와 효율적인 운영을 위해서는 상수관망 시스템의 용수 공급능력을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 이러한 노력의 일환으로 상수관망 시스템 내 에너지 거동을 통해 신뢰도를 정량화한 신뢰도 지수가 다양한 방법으로 개발되어 왔다. 대부분의 신뢰도 지수는 공통적으로 절점에서의 최소요구수두 및 초과수두의 형태로 공급된 에너지를 기반으로 산정되며, 일부 지수의 경우 상수관망에 공급된 총 에너지 또는 용수 공급과정에서 손실된 에너지를 추가적으로 고려하여 산정된다. 본 연구에서는 상수관망의 용수 공급 과정에 따른 에너지 구성 요소를 소개하였으며 기존에 개발된 몇 가지 신뢰도 지수를 대상으로, 상수관망의 공급부하 상황을 고려한 시나리오 분석을 통해 신뢰도 지수의 적용성을 알아보고자 하였다. 또한, 각 절점 별 지수값을 도시함으로써, 상수관망 내 신뢰도의 공간적 분포를 나타내어 분석함으로써 보다 확장된 시스템 신뢰도 지수의 활용방안을 제시하였다.

**핵심용어:** 신뢰도 지수, 상수관망 시스템, 에너지 흐름 분석

### 1. 서 론

상수관망 시스템(Water Distribution System, WDS)은 다

수의 이용자에게 용수를 안정적으로 공급하기 위한 사회기반 시설물이다. 이 때, 상수관망 시스템의 안정적인 용수공급 능력이란 기본적으로 평상시 이용자들의 편리한 상수도 이용을 보장하는 것을 말하지만, 더 나아가 예상치 못한 비상상황에서도 효율적이고 탄력적인 용수공급 환경을 제공하는 것을 포함한다.

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513  
E-mail: doosunkang@gmail.com (D. Kang)

상수관망의 용수공급 신뢰도는 크게 세 가지 형태로 분류될 수 있다. 수요자가 필요로 하는 수량이 적절한 압력으로 공급가능한지 여부를 판단하는 수리학적 신뢰도(hydraulic reliability), 단순히 관망의 연결 상태를 통해 수요절점과 공급원의 연결여부를 판단하는 신뢰도(connectivity reliability), 그리고 시스템 내 구조물 파손에 따른 용수공급 가능여부를 판단하는 구조적 신뢰도(mechanical reliability) 등으로 구분할 수 있다. 이 중 상수관망 시스템의 수리학적 안정성에 따른 용수공급 신뢰도를 정량적으로 평가하기 위해, 현재까지 1) 용수공급 가능량, 2) 공급수압 및 3) 시스템 내 에너지 분포 등의 정보를 이용한 지수(Index)를 개발하여 적용한 연구가 진행되었다. 이 중 상수관망 내 에너지의 분포를 이용한 공급 신뢰도 평가는 공급수량과 공급수압이 함께 고려되기 때문에 상수관망 시스템의 안정적인 역할 수행을 한눈에 평가할 수 있는 장점이 있어, 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 상수관망 시스템 내에서 발생하는 에너지의 공급과 사용, 손실 등의 거동을 분석하여, Todini (2000)는 시스템 전체의 신뢰도를 정량화한 Resilience Index (RI)를 제안하였다. 이후, Prasad and Park (2004), Jayaram and Srinivasan (2008), Raad et al. (2010) 등의 연구자들이 상수관망 시스템의 다양한 특성을 추가적으로 반영하여 Todini의 RI를 개선하였고, Farmani et al. (2005), Reza et al. (2008), Di Nardo et al. (2010), Banos et al. (2011), Greco et al. (2012), Creaco et al. (2013), Atkinson et al. (2014) 등의 연구자들은 개발된 신뢰도 정량화 기법들을 비교 분석하고, 이를 시스템 설계 및 운영에 활용하기 위한 다양한 연구를 수행하였다. 또한, Cabrera et al. (2010), Dziedzic and Karney (2014) 등의 연구자들은 기존의 RI 연구와 다르게 시스템 내 에너지 요소를 구분하고, 이를 적용한 신뢰도 정량화 지수들을 제안하였다.

그러나 기존의 에너지 기반 신뢰도 정량화 지수들은 절점에서 나타난 에너지 요소를 주로 이용하기 때문에 시스템 내 전반적인 에너지 분포를 충분히 반영하지 못하고 있다. 또한 시스템 전체의 신뢰도를 하나의 지수 값으로 정량화함으로써 시스템 내부에서 발생하는 공간적인 에너지 흐름과 이를 통한 신뢰도 지수의 공간적인 분포를 분석하지 못하는 등 문제점이 존재한다. 그러므로 본격적인 신뢰도 지수의 활용에 앞서 합리적인 정량화 방법, 상수관망 내부의 에너지 분포 및 흐름 현상을 구체적으로 나타낼 수 있는 방안 등의 연구가 필요하다. 기존에 개발된 지수값 중 Jayaram and Srinivasan (2008)이 제안한 Modified Resilience Index (MRI)는 절점 별 지수값을 산정할 수 있어 시스템 내 에너지의 공간적인 분포양상을 파악할 수 있어 유용한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는

상수관망 시스템에서 발생할 수 있는 몇 가지 공급부하 조건을 가정하고, 기존에 널리 활용되고 있는 정량화 지수를 적용, 산정하여 신뢰도 지수의 활용성을 평가하였다. 특히, 절점별로 MRI 값을 산정하고 이를 등수치선(contour map)을 이용하여 공간적으로 시각화함으로써 기존의 신뢰도 지수 활용방법을 개선하였다. 이는 비상상황이 발생하였을 경우 영향범위를 파악하는 등 시스템의 효율적인 운영을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 기존에 개발된 상수관망의 신뢰도 지수를 국내 여건의 용수공급 부하시나리오에 맞추어 그 적용성을 알아보고자 하였으며, 이는 기존 지수의 한계점을 파악하여 향후 효과적인 신뢰도 지수의 개발 연구에 기여할 수 있을 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장의 방법론은 크게 2개의 sub-section으로 구성되어 있는데, 2.1장에서는 상수관망 시스템 내의 에너지 분포를 목적 및 형태에 따라 구분하고, 에너지 요소별로 산정 과정을 정리하였다. 에너지를 활용한 기존의 신뢰도 지수 중 RI, MRI, 그리고 EI (Efficiency Indicator, Cabrera et al., 2010) 등의 지수를 선정하고, 그 산정 방식과 특징을 2.2장에서 설명하였다. 3장의 적용 및 결과에서는 신뢰도 지수를 적용하기 위한 가상의 네트워크를 소개하고, 상수관망에서 발생할 수 있는 몇 가지 공급부하 상황을 적용하여 각 신뢰도 지수 별 산정 결과와 공간적 MRI 분포를 비교, 분석하였다. 끝으로, 4장에서는 본 연구의 결론을 제시하고, 기대효과 및 활용방안을 제안하였다.

## 2. 상수관망 시스템의 에너지 정량화 지수

### 2.1 상수관망 시스템 내 에너지 구성

상수관망 시스템에 존재하는 에너지 관련 요소는 Fig. 1(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 이들은 크게 다음과 같은 세 가지 범주의 에너지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 시스템에 에너지를 공급하는 역할인 Input Energy, 두 번째로 물이 상수관망 시스템을 통해 이동하는 과정에서 소모되는 Loss Energy, 세 번째로 이용자가 수요지에서 공급받아 사용하는 Output Energy가 있다. 이들 세 가지 범주의 에너지를 상세히 구분하면 아래와 같다.

Input Energy ( $E_{input}$ )는 Eq. (1a)와 같이 공급원이 가진 위치수두로부터 공급된 에너지( $E_{source}$ )와 펌프로부터 공급된 에너지( $E_{pump}$ )의 합이며,  $E_{source}$ 와  $E_{pump}$ 는 각각 Eqs. (1b) and (1c)와 같이 산정할 수 있다.

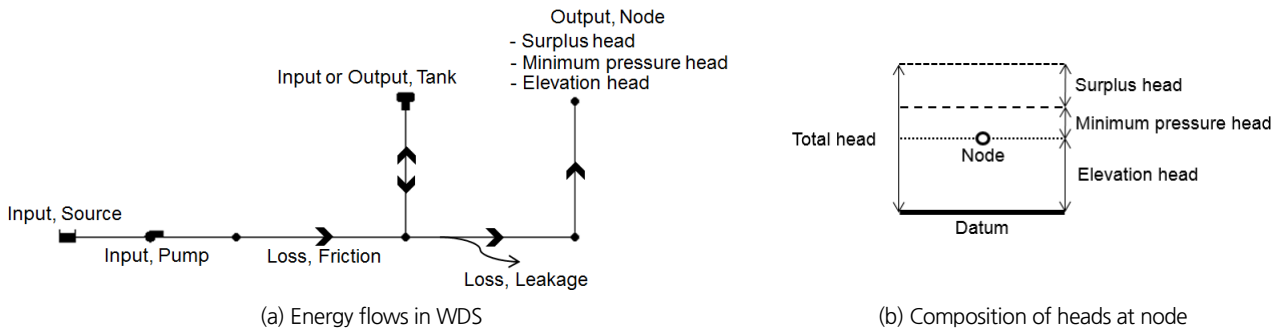


Fig. 1. Energy composition in WDS

$$E_{input} = E_{source} + E_{pump} \quad (1a)$$

$$E_{source} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{nsource} Q_{source,j}^t H_{source,j}^t \Delta t \quad (1b)$$

$$E_{pump} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{npump} Q_{pump,i}^t H_{pump,i}^t \Delta t \quad (1c)$$

여기서,  $T$ : 전체 모의시간,  $\Delta t$ : 모의시간 간격,  $nsource$ ,  $npump$ : 시스템 내 공급원 및 펌프의 수,  $Q_{source,j}^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 공급원으로부터 공급된 유량,  $Q_{pump,i}^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 펌프를 통과한 유량,  $H_{source,j}^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 공급원의 총 수두,  $H_{pump,i}^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 펌프의 양정고,  $\gamma$ : 물의 단위중량을 의미한다.

Loss Energy ( $E_{loss}$ )는 물이 상수관망 시스템 내에서 이동하는 동안 관 내부의 벽과 마찰하여 발생하는 마찰 손실 ( $E_{friction}$ )과 단면의 급격한 확대/축소, 밸브 등에서 발생하는 미소 손실, 그리고 관의 균열 및 파열 등으로 인한 누수로 인해 소실된 에너지( $E_{leak}$ )로 구분할 수 있다. 하지만 일반적으로 미소 손실은 타 손실량에 비해 미소하기 때문에 고려하지 않는다. 따라서  $E_{loss}$ 는 Eq. (2a)와 같이  $E_{friction}$ 과  $E_{leak}$ 의 합이며,  $E_{friction}$ 과  $E_{leak}$ 은 각각 Eqs. (2b) and (2c)와 같이 산정할 수 있다.

$$E_{loss} = E_{friction} + E_{leak} \quad (2a)$$

$$E_{friction} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{npipe} Q_i^t H_{loss,i}^t \Delta t \quad (2b)$$

$$E_{leak} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{npipe} Q_{leak,i}^t H_i^t \Delta t \quad (2c)$$

여기서,  $npipe$ : 시스템 내 관로의 수,  $Q_i^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 관로의 유량,  $Q_{leak,i}^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 관로의 누수량,  $H_{loss,i}^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 관로의 손실수두,  $H_i^t$ :  $t$ 시점에  $i$ 번째 관로 내 총 수두 (일반적으로, 해당관로의 상·하류 절점의 총 수두의 평균값)이다.

수요절점에서의 총 수두( $H_{tot}$ )는 Fig. 1(b)와 같이 절점의 표고 수두( $H_{ele}$ ), 최소요구 압력수두( $H_{min}$ ), 잉여 압력수두( $H_{surp}$ )의 합이며 Eq. (3a)와 같이 표현할 수 있다. 또한, Eq. (3b)와 같이 표고 수두( $H_{ele}$ )에 최소요구 압력수두( $H_{min}$ )를 합한 값을 최소요구수두( $H_{req}$ )라고 정의한다. 따라서, 총 수두( $H_{tot}$ ) 중에서 최소요구수두( $H_{req}$ )를 초과한 수두가 바로 잉여 압력수두( $H_{surp}$ )가 된다.

$$H_{tot} = H_{ele} + H_{min} + H_{surp} \quad (3a)$$

$$H_{req} = H_{ele} + H_{min} \quad (3b)$$

따라서, Output Energy ( $E_{output}$ )는 절점까지 물이 도달하기 위해서 필요한 표고에너지(Elevation Energy,  $E_{ele}$ ), 절점의 표고로부터 원활한 용수사용을 위해 필요로 하는 최소요구 압력에너지(Minimum Required Pressure Energy,  $E_{min}$ ), 최소요구수두를 넘어서 초과된 잉여수두로 인한 잉여에너지(Surplus Energy,  $E_{surp}$ )로 구분할 수 있다. 따라서  $E_{output}$ 은 Eq. (4a)와 같이  $E_{ele}$ ,  $E_{min}$ 과  $E_{surp}$ 의 합이며,  $E_{ele}$ ,  $E_{min}$ 과  $E_{surp}$ 는 각각 Eqs. (4b)~(4d)와 같이 산정할 수 있다.

$$E_{output} = E_{ele} + E_{min} + E_{surp} \quad (4a)$$

$$E_{ele} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{ele,j}^t \Delta t \quad (4b)$$

$$E_{min} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{min,j}^t \Delta t \quad (4c)$$

$$E_{surp} = \gamma \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{surp,j}^t \Delta t \quad (4d)$$

여기서,  $nnode$ : 시스템 내 절점의 수,  $H_{ele,j}^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 절점의 표고수두,  $H_{min,j}^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 절점의 최소요구 압력수두,  $H_{surp,j}^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 절점의 잉여 압력수두,  $q_j^t$ :  $t$ 시점에  $j$ 번째 절점의 수요량이다.

따라서 상수관망 내로 공급되는 Input Energy ( $E_{input}$ )는 관망 내 Loss Energy ( $E_{loss}$ )와 절점을 통해 공급되는 Output Energy ( $E_{output}$ )의 합이며, 이는 에너지 보존의 법칙을 만족한다.

$$E_{input} = E_{loss} + E_{output} \quad (5)$$

Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이, 배수지의 경우 상수관망 시스템에 물을 공급하는 공급원이 되기도 하지만 반대로 시스템으로부터 물을 공급받는 수요자가 되기도 하므로, Input Energy와 Output Energy의 특성을 모두 갖는 요소로 볼 수 있다. 충분히 긴 시간의 용수 공급 과정에서 배수지는 특정한 주기로 물을 공급하거나 공급받기 때문에 저류된 수량이 일정하다는 사실을 고려할 경우, 결과적으로 배수지는 Input Energy와 Output Energy에 모두 영향을 미치지 않는 요소라고 판단할 수 있다.

## 2.2 상수관망 시스템의 에너지 정량화 지수

Todini (2000)는 다양한 비상 상황에 대응하기 위한 상수관망의 능력으로서, 시스템 전체에 대한 복원력을 하나의 지수 (Index) 형태로 정의한 바 있다. 상수관망에서의 복원력이란, 다양한 비상상황이 발생하였을 경우에 이를 극복하고 적절한 수압으로 필요수량을 공급할 수 있는 시스템의 능력을 의미한다. 즉, 복원력이 높을수록 시스템 내에 안정성을 위한 여분의 에너지가 더 많이 공급되고 있으며, 신뢰도가 크다는 것을 의미한다. 한편, 비상 상황에 대비하기 위하여 시스템 내에 존재하는 여분의 에너지를 유지하기 위해서 입력 에너지가 과다하게 투입될 수 있으며, 이는 상수관망의 효율적인 운영(즉, 에너지 최적관리)을 위해서는 최소화할 필요가 있다. 본 연구에서는 상수관망 시스템의 신뢰도 정량화 지수로 Todini (2000)가 제안한 RI와 함께, Jayaram and Srinivasan (2008)의 MRI 및

Cabrera et al. (2010)의 EI를 활용하였으며, 각 신뢰도 지수에 대한 설명은 다음과 같다.

### 2.2.1 Resilience Index (Todini, 2000)

RI는 아래의 Eq. (6)과 같은 방법으로 산정한다. 즉, 상수관망 시스템 내 수요절점에 공급된 잉여 에너지를 시스템에 공급되는 Input Energy에서 최소요구 에너지를 제외한 부분으로 나누어 산정하는 방식이며, 간단히 말해 최소요구 에너지를 제외한 Input Energy 중 잉여 에너지의 비율이다. 따라서 RI는 일반적으로 0~1 사이의 값으로 산정되지만, 수요절점에서의 총수두가 최소요구수두를 만족하지 못하는 경우 잉여수두가 아닌 결핍수두(Deficit Head)가 나타나는 것을 고려할 수 있기 때문에 경우에 따라 음수의 값이 산정될 수 있다. 높은 RI 값을 가질수록 수요절점의 잉여수두가 크거나, 시스템에 공급된 잉여 및 손실에너지 중 수요절점에 공급된 잉여에너지가 차지하는 비중이 크다는 것을 의미한다. 즉, 비상상황 시 수요절점에서 최소요구수두를 유지할 수 있는 능력이 더 높다는 것을 의미한다. 이 때, 적정수준 이상의 잉여수두는 오히려 상수관망의 물리적 안정성을 저해하고 누수량 증가에 의한 유출 저감 등 부정적인 요소로 작용할 수 있으므로, 잉여수두에 대한 적정수준이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

$$RI^t = \frac{\gamma \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t (H_{tot,j}^t - H_{req,j}^t) \Delta t}{\gamma \sum_{j=1}^{nsource} Q_{source,j}^t H_{source,j}^t \Delta t + \gamma \sum_{i=1}^{npump} Q_{pump,i}^t H_{pump,i}^t \Delta t - \gamma \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{req,j}^t \Delta t} = \frac{E_{surp}^t}{E_{input}^t - E_{req}^t} \quad (6)$$

### 2.2.2 Modified Resilience Index (Jayaram and Srinivasan, 2008)

MRI는 아래의 Eq. (7)과 같은 방법으로 산정한다. Eq. (7a)는 시스템 내 수요절점에 공급된 잉여 에너지를 수요절점에 필요한 최소요구에너지로 나누어 산정하는 방식이며, 이는 두 에너지 간의 비율을 의미한다. 따라서 MRI는 1보다 큰 값을 가질 수 있고, RI와 마찬가지로 결핍 수두를 고려할 수 있기 때문에 음수의 값이 산정될 수 있다. 또한 MRI는 산정 방식상, 수요절점에서의 에너지만을 고려하기 때문에 Eq. (7a)와 같은 방식의 시스템 전체 값뿐만 아니라, Eq. (7b)와 같이 절점별 지수 산정이 가능하며, 따라서 시스템 내 지수 값의 공간적인 분포양상을 산정할 수 있다.

$$MRI^t = \frac{\gamma \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t (H_{tot,j}^t - H_{req,j}^t) \Delta t}{\gamma \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{req,j}^t \Delta t} = \frac{E_{surp}^t}{E_{req}^t} \quad (7a)$$

$$MRI_j^t = \frac{\gamma q_j^t (H_{tot,j}^t - H_{req,j}^t) \Delta t}{\gamma q_j^t H_{req,j}^t \Delta t} = \frac{E_{surp,j}^t}{E_{req,j}^t} = \frac{H_{surp,j}^t}{H_{req,j}^t} \quad (7b)$$

단, 고지대에 위치한 상수관망의 경우 모든 절점들이 매우 높은 표고 수두( $H_{cle}$ )를 갖게 되는데, 이 경우 Eq. (7a)의 분모 값이 증가하여 상대적으로 지수 값이 과소추정 될 우려가 있다. 그러므로 해당 관망 내에서의 표고 관계만을 고려해야 하며, 이를 위해서는 시스템 내 절점들 중 가장 낮은 표고를 가진 절점을 기준면(Datum)이 되도록 보정한 후, 절점의 표고 수두를 재산정하도록 한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 상수관망의 신뢰도 지수를 고려하였으며, MRI의 경우 절점 별 신뢰도 지수를 산정하고, 등가곡선을 이용하여 지수 값의 공간적 분포를 시각화하였다.

2.2.3 Efficiency Indicator (Cabrera et al., 2010)

EI는 아래의 Eq. (8)과 같은 방법으로 산정한다. 즉, 수요절점에 공급된 총 Output Energy를 시스템에 공급된 Input Energy로 나누어 산정하는 방식이며, 다시 말해, 전체 Input Energy 중 수요절점에 공급된 Output Energy의 비율이다. 따

라서 EI는 반드시 0~1 사이의 값으로 산정되며, 높은 EI 값을 가질수록 시스템에 공급한 에너지를 수요절점까지 전달하는 능력이 높은 것을 의미한다.

EI는 앞서 소개한 RI, MRI와 다르게 용수 공급의 안정성 및 비상상황에서의 복원력을 평가하기 위한 목적보다는 시스템 전반적인 에너지 효율을 평가하기 위한 지수라고 할 수 있다. RI 및 MRI와 같은 복원력 지수는 절점에서의 공급 안정성을 집중적으로 산정한다는 장점이 있으나, 상수관망 내 에너지 구성요소 중 일부 에너지 요소를 활용하기 때문에 시스템 전반적인 에너지 총량 및 공급, 손실 비율은 파악할 수 없다. EI는 이러한 측면을 보완할 수 있으므로, 함께 비교, 분석할 경우, 시스템의 총 에너지 중 관로에서 손실된 에너지의 규모 역시 파악할 수 있어 수두 손실이 복원력 변화에 미치는 영향을 보다 구체적으로 분석할 수 있는 장점이 있다.

$$EI^t = \frac{\gamma \sum_{j=1}^{nnode} q_j^t H_{tot,j}^t \Delta t}{\gamma \sum_{j=1}^{nsource} Q_{source,j}^t H_{source,j}^t \Delta t + \gamma \sum_{i=1}^{npump} Q_{pump,i}^t H_{pump,i}^t \Delta t} = \frac{E_{output}^t}{E_{input}^t} \quad (8)$$

3. 적용결과 및 분석

3.1 적용 네트워크

본 연구에서는 Fig. 2에 도시된 미국 A시의 물 공급 네트워크

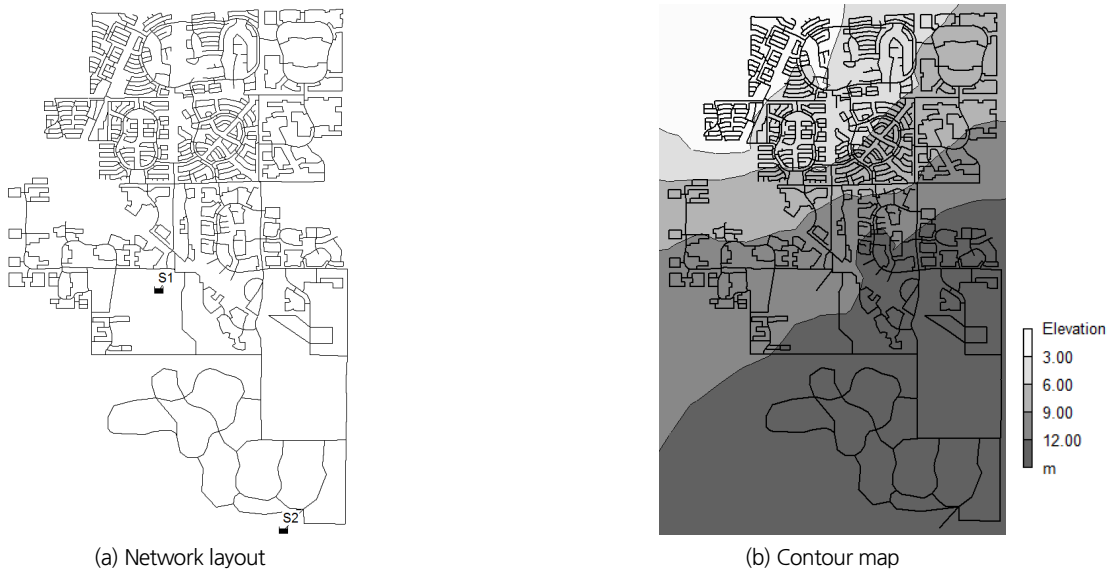


Fig. 2. Application network

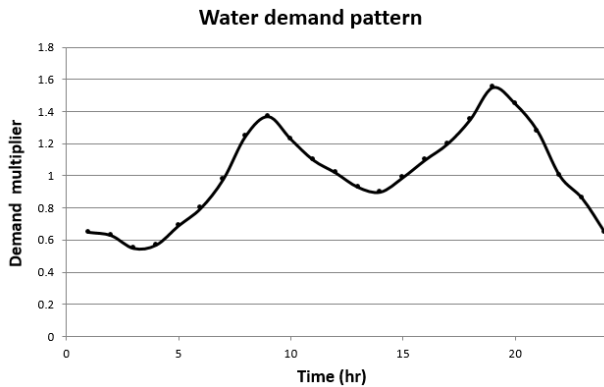


Fig. 3. 24-hr water demand pattern

크를 대상으로, 국내 상수도 이용 현황을 고려한 몇 가지 시나리오를 구성하여 앞서 소개한 신뢰도 지수를 산정하였다. 적용 네트워크는 2개의 공급원으로부터 1,452개의 관로를 통해 1,107 여개의 수요절점에 물을 공급하며 수요지점은 대부분 주거지역으로 가정하였다. 적용 네트워크에서의 물 수요는 2,115 m<sup>3</sup>/h의 수요량을 기준으로, 24시간 동안의 물 사용량 패턴(Fig. 3)에 따라 시스템 내 용수 흐름상황이 수시로 변화한다. 이때, 두 개의 공급원 S1, S2의 총 수두는 각각 48.3, 56.3 m이며 용수공급은 각 공급원으로부터 자연유하 방식으로 이루어진다. 공급원이 두 곳이기 때문에 동일 절점이라 하더라도 시간에 따른 수압변동에 따라 용수 공급원이 수시로 변화할 수 있다. 이는 상대적으로 공급원 S1의 수두가 낮아 주변 절점의 공급압력이 높게 분포하는 시간대에는 용수공급가능 지역이 좁고, 반대로 용수 사용량이 많아 공급압력이 하강하는 시간대에는 용수공급 가능지역이 넓게 분포하기 때문이다. 이는 상대적으로 공급원 S1의 수두가 낮아 주변 절점의 공급압력이 높게 분포하는 시간대에는 용수공급가능 지역이 좁고, 반대로 용수 사용량이 많아 공급압력이 하강하는 시간대에는 용수공급 가능지역이 넓게 분포하기 때문이다. 해당 시스템의 경우, 원활한 용수공급을 위해 요구되는 최소요구압력수두( $H_{min}$ )는 15 m로 설정하였다. 본 연구에서는 수리해석 모의를 위해 상수관망 설계/해석 프로그램인 EPANET (U.S. EPA, 2000)을 활용하였으며, 다양한 시나리오 적용 및 신뢰도 지수 산정결과와의 비교, 분석을 위해 공학용 프로그래밍 언어인 MATLAB (MathWorks Inc., 2000)을 활용하였다.

### 3.2 상수관망의 공급부하 시나리오

본 연구에서는 상수관망의 용수공급에 영향을 줄 수 있는 다양한 상황 중, 주로 발생하기 쉬운 세 가지의 상황을 시나리오로 구성하여 신뢰도 지수를 산정하였다. 상수관망에서 발

생할 수 있는 용수공급 과부하 현상은 대표적으로, 용수 사용량 자체가 증가하는 경우 또는 송수 과정에서 특정 관로의 유량부하가 높아지는 경우를 예로 들 수 있다. 이때, 용수 사용량의 증가는 상수도 사용량을 추정하는 과정에서 시스템 전반에 걸친 수요량의 증가, 일정 지역 및 시간대에 집중적으로 높은 수요가 발생하는 국지적인 수요량의 증가로 구분할 수 있다. 첫 번째 시나리오는 시스템 전체에 걸쳐 용수 사용량이 증가하는 경우에 해당하며, 이는 여름철 기온 상승 등으로 인해 가정 내 물 소비량이 증가하는 상황에서 시스템의 신뢰도 변동을 모의하여 수행되었다. 두 번째 시나리오는 대규모 관로에서 관 파손이 발생하여 주요 공급 경로가 폐쇄된 경우이며, 많은 양의 용수가 네트워크 설계 시점과 다른 경로를 통해 공급되는 상황을 모의할 수 있다. 세 번째 시나리오는 용수 사용량이 국지적으로 증가하는 경우에 해당하며, 상수관망의 특정 단위 구역에서 대규모 화재가 발생하는 상황을 모의하여 수행되었다. 각각의 시나리오는 구체적으로 다음과 같이 구성되었다.

#### (1) 용수 사용량의 증가(시나리오 1)

최근 기후변화로 인한 물 사용량의 예측이 점차 어려워지고 있다. 특히, 여름철 기온 상승으로 인한 상수도 사용량의 순간적인 증가는 상수관망의 설계 시 고려한 장기적인 수요량 증가 추세를 상회하고 있으며, 이로 인한 시스템의 일시적인 공급 과부하 빈도가 꾸준히 증가하고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008)의 연구결과에 의하면, 기온 상승과 상수도 사용량 사이의 관계는 여름철 및 최고 기온이 발생하는 시점에 더욱 밀접한 연관성을 보이는 것으로 나타났으며, 구체적으로 2.2°C의 기온 상승은 여름철 전반에 걸쳐 2.8%, 가장 더운 달에는 순간적으로 8%의 수요를 증가시키며, 4.4°C의 기온 상승은 여름철 전반에 걸쳐 5%, 가장 더운 달에는 16%의 수요를 증가시키는 것으로 분석되었다. 기상청 관측 자료를 분석한 결과, 지난 30년간 우리나라 여름철 최고기온은 최대 3.1°C, 8월 최고기온은 최대 3.9°C의 차이를 보임에 따라, 국내에서도 기온 상승의 영향을 고려한 용수공급 안정성 분석이 필요한 것으로 판단된다.

앞서 소개한 바와 같이, 적용 네트워크에서는 시스템 전체에 걸쳐 2,115 m<sup>3</sup>/h의 용수를 기준 수요량으로 하고 있으며, 따라서 본 시나리오 1에서는 기온 상승에 따른 상수관망의 용수공급 안정성 영향을 모의하기 위해, 약 15% 증가된 2,432 m<sup>3</sup>/h의 기준 수요량을 적용하였다.

#### (2) 관로의 구간 폐쇄(시나리오 2)

도시지역에서의 상수관망은 경제성과 안전성을 고려하기

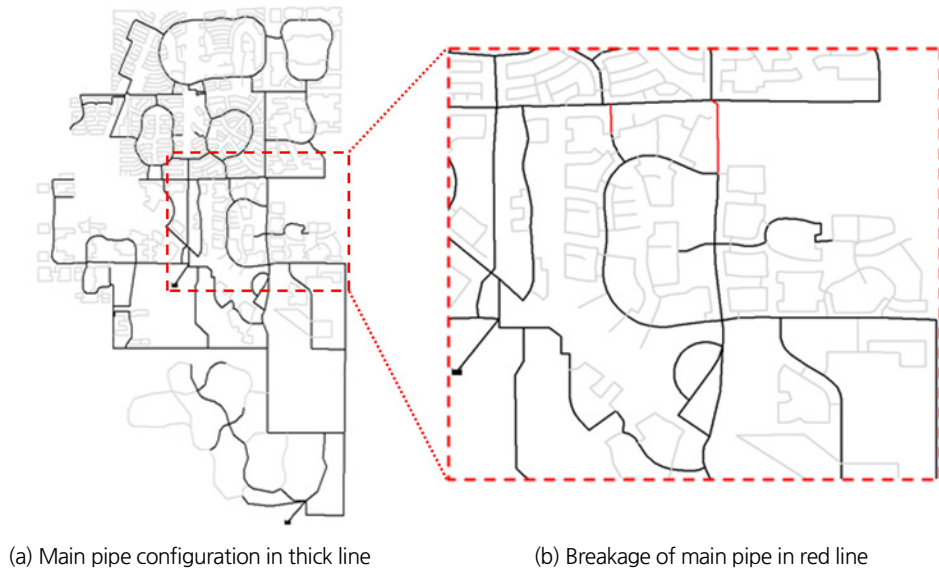


Fig. 4. Network layout for scenario 2

위해, 간단한 Branch-type 부터 Loop-type 혹은 Grid-type에 이르기까지 매우 복잡한 형태를 이루고 있다. 상수관로는 원활한 용수 공급을 위해 많은 유량의 송수에 관여하는 대규모의 송수관(Water transmission main)과, 비교적 적은 유량의 송수에 관여하는 소규모의 간선 관로(Local distribution pipe)로 이루어져 있다. 간선 관로는 공급부하가 상대적으로 작아, 누수와 관 파손 등의 문제가 발생하더라도 용수 공급에 미치는 영향이 상대적으로 작다. 그러나 송수관에 해당하는 관로는 평상시에도 많은 공급부하를 받고 있어 누수와 관 파손 등의 문제가 발생할 경우 상수관망 내 주요 흐름상황이 변하는 등 용수 공급능력이 눈에 띄게 감소한다.

본 연구의 적용 네트워크에서는 직경 250 mm를 기준으로 상수관망 내 송수관과 간선을 구분하고 있으며, Fig. 4(a)를 통해 송수관 및 간선 관로의 구조를 파악할 수 있다. 두 번째 시나리오에서는 송수관에 해당하는 2개의 관로가 파손되어 특정 구간의 용수공급 경로가 차단되는 상황을 모의하였으며, Fig. 4(b)에서 붉은색으로 표시된 관로가 차폐된 송수관을 나타낸다. 이 때, 실제 상수관망에서 관 파손이 발생하는 경우, 제수 밸브의 설치 여건에 따라 인근에 위치한 일부 정상 관로에서의 물 공급이 함께 제한되며, 단수 지역이 발생할 수 있다. 그러나 본 시나리오 2에서는 용수 흐름상 주요 경로에 해당하는 관을 차단함으로써 특정 관로의 유량 부하가 높아지는 상황을 알아보고자 하였으므로 각 파손관의 양단에 모두 제수 밸브가 설치되어 있는 것으로 가정하여 추가적인 관로 차단은 고려하지 않았다.

### (3) 대규모 화재 발생(시나리오 3)

상수관망의 주요 기능은 평상시 용수공급 뿐만 아니라, 화재를 비롯한 대규모 물 수요가 요구되는 상황에서의 비상시 물 공급 역할을 포함한다. 특히, 인구가 밀집된 주거지역에서 발생한 화재는 주변 지역으로 빠르게 전이되어 대규모 화재로 발전하는 경우가 많다. 이러한 경우 소화용수의 사용으로 인해 짧은 시간동안 물 사용량이 급격히 증가하며, 다수의 물 수요 절점이 밀접하게 연관되어 있는 상수관망의 구조 상, 주변 지역의 물 공급에 지장을 줄 수 있다. 본 연구에서는 주거지역에서의 대규모 화재 발생 상황을 가정하고, 이를 소화하는 과정에서 상수관망에 많은 수요량이 급격히 부하되는 경우 상수관망의 신뢰도 지수에 어떤 변화가 발생하는지 분석하기 위해 세 번째 시나리오를 구성하였다.

국민안전처(2015)에서 고시한 국내 「옥외소화전설비 화재안전기준」에 따르면, 단위구획 당 소화 설비는 최소 350 L/min (21.0 m<sup>3</sup>/h)의 유량을 20분 이상 유지할 수 있도록 규정하고 있다. 본 연구의 화재 시나리오에서는 이러한 기준을 참고하여 화재 발생 시 소화용수 사용량을 각 소화 설비 당 400 L/min (24.0 m<sup>3</sup>/h)으로 추정하였으며, 수요량 부하가 가장 심한 19시에 이를 적용하였다. 이는 네트워크 전반에 걸쳐 17.0%의 수요량이 증가한 것에 해당하며, 시나리오 1과는 다르게 증가된 수요량이 적은 지역에서 집중적으로 발생한다는 차이점이 있다. 구체적인 시나리오 적용 대상 지역은 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다.



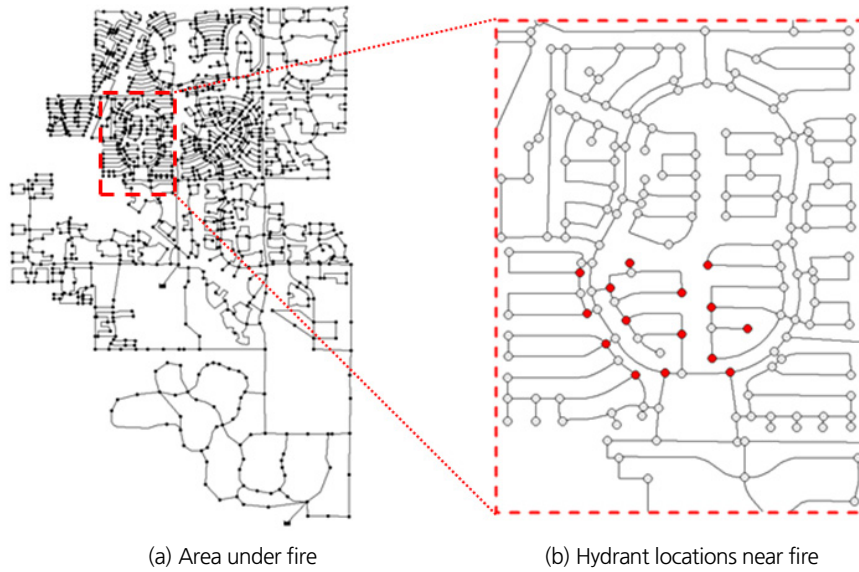


Fig. 5. Network layout for scenario 3

3.3 신뢰도 지수 비교 분석

앞서 선정된 세 가지 신뢰도 지수를 대상 네트워크의 세 가지 시나리오에 적용하여, 시·공간적 변화 양상을 비교, 분석하였다. 시스템 전체의 신뢰도를 나타내는 RI, MRI 및 EI의 산정 결과는 24시간 수요량 변화를 반영하여 시간별 신뢰도의 변동량을 분석하였고, 각 절점에서의 복원력을 나타내는 절점별 MRI의 산정 결과는 물 사용량이 가장 낮은 03:00 시와 사용량이 가장 높은 19:00 시의 결과를 등수치선 형태로 도시하여 공간적인 신뢰도를 분석하고, 공급안정성이 위협받기 쉬운 19:00 시의 결과에 대해 시나리오 별로 신뢰도 지수의 공간적인 분포가 어떠한 차이를 보이는지 비교, 분석하였다.

3.3.1 신뢰도의 시간적 분포

공급부하 시나리오를 적용하지 않은 기본상태(Base condition)에서의 신뢰도 지수는 시간에 따라 Fig. 6(a)와 같이 산정되었다. EI 값을 통해 절점에 공급되는 에너지와 관에서 손실되는 에너지의 규모를 파악할 수 있으며, RI, MRI 값을 통해 시스템 복원력의 변화 양상을 파악할 수 있다. 이 때, 세 가지 지수 모두 용수 사용량이 적은 시간대에는 높고, 반대로 용수 공급이 많은 시간대에는 낮게 산정되어 용수 사용패턴과 반대의 양상을 보였으며, 이는 용수 사용량이 많은 시간대에 손실 에너지(Loss Energy)가 크기 때문이다. 또한, 이처럼 다양한 지수를 동시에 산정함으로써 보다 구체적인 에너지 분포 현황을 분석할 수 있다. 예를 들어, 용수 사용량이 적은 03:00 시간대의 경우, EI 값은 약 0.9를 나타내므로 시스템 전체 입력 에너지 중 약 90%의 에너지가 절점에 공급되고 있으며, MRI 값이

약 0.8을 나타내어 절점에 공급된 에너지 중 최소요구 에너지와 잉여 에너지의 비율이 5:4 수준임을 알 수 있다. 결론적으로, 해당 시간에 전체 입력 에너지의 약 40%가 시스템 복원력에 기여하는 잉여 에너지이고, 절점에서 평균적으로 약 0.8 수준의 충분한 복원력을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다. 더 나아가, RI, MRI 값이 전 기간에 걸쳐 유사하게 산정되었음을 통해, 시스템 내 손실 에너지와 잉여 에너지의 합이 절점에서 필요한 최소요구 에너지와 비슷한 수준이라는 것을 알 수 있다. 이와 같이 몇 가지 신뢰도 지수를 통해 상수관망 내 에너지 흐름을 분석할 수 있으며, 본 연구에서 모의한 시나리오별 신뢰도 지수의 변화는 다음과 같다.

(1) 용수사용량의 증가(시나리오 1)

용수사용량이 시스템 전반에 걸쳐 증가하는 시나리오 1의 경우, 각각의 신뢰도 지수는 시간에 따라 Fig. 6(b)와 같은 양상을 보였다. 세 가지 지수 모두 Base condition에 비해 전체적으로 감소하는 양상을 보였으며, EI 값은 상대적으로 감소폭이 적은 것으로 나타났다. 이 때, EI 값의 감소는 증가된 물 사용량으로 인해 관 마찰로 손실되는 에너지가 증가하여 절점에 공급된 에너지가 감소하기 때문이며, MRI 값이 감소한 이유는 모든 절점에서 수요량이 증가하여, 분자의 잉여에너지는 감소한 반면 분모의 최소요구에너지는 증가하기 때문이다. 또한, RI 값의 감소는 시스템 내 손실에너지의 증가로 절점의 잉여에너지가 감소한 요인이 가장 크다고 할 수 있다. 이와 같이 시나리오 1의 적용 결과를 통해 용수 사용량 증가에 따른 시스템 내 에너지 분포 및 복원력 변화 양상을 분석하였다.



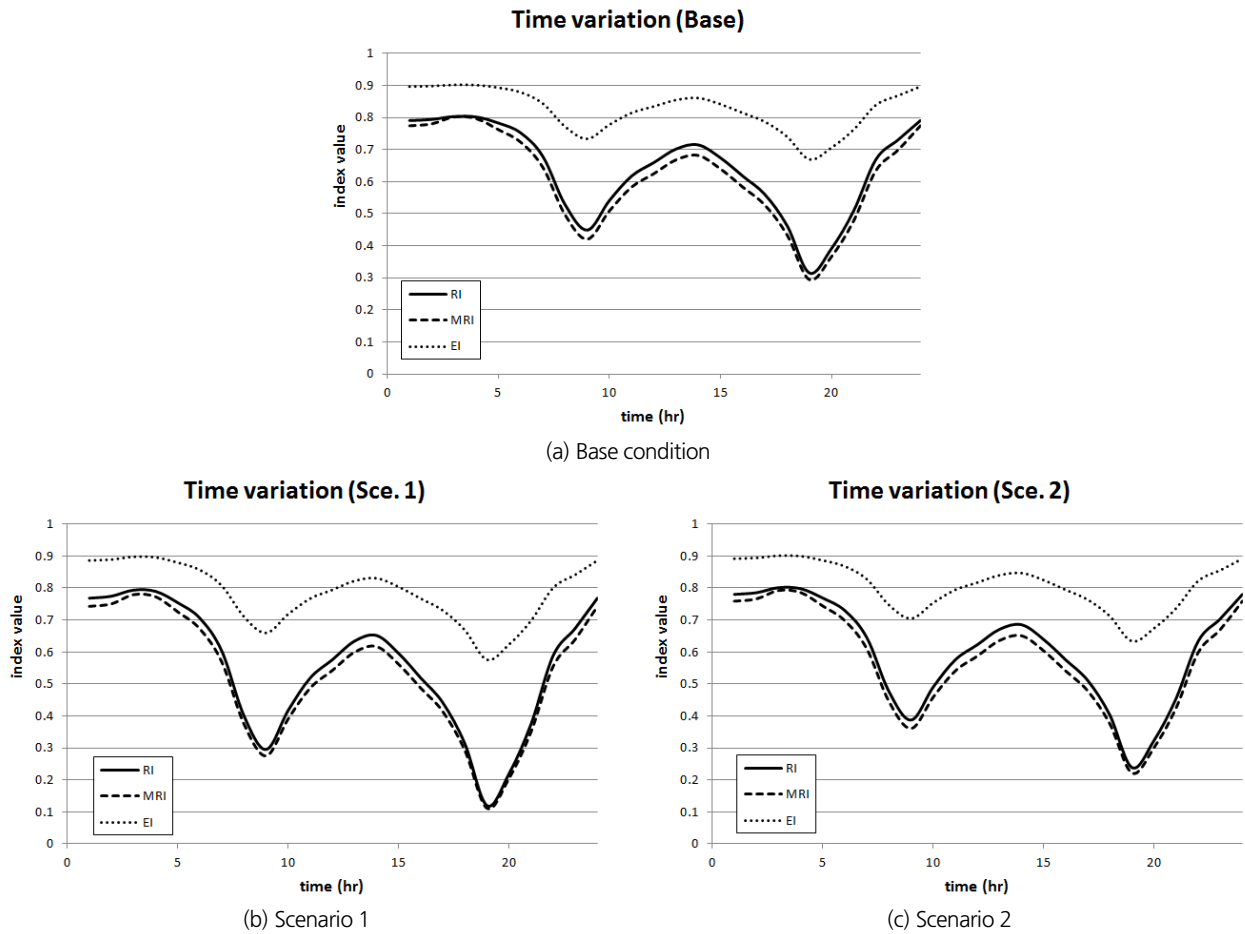


Fig. 6. Temporal variations of system reliability indices

### (2) 관로의 구간 폐쇄(시나리오 2)

주관로 파손에 의해 일부 용수공급 경로가 제한되었을 경우를 모의한 시나리오 2의 경우, 각각의 신뢰도 지수는 Fig. 6(c)와 같은 결과를 보였다. 시나리오 1과 비교하여 지수값의 변화가 작게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 용수이동이 특정 경로로 집중되어 나타난 손실 에너지 증가 및 잉여 에너지 감소 현상이 네트워크의 일부 지역에만 영향을 미치기 때문이다. 특히, 기존에 공급원 S2로부터 용수를 공급받던 절점에서 공급경로 변경으로 인해 수도 손실이 일정 수준 이상으로 발생하는 경우, 공급원 S1이 용수공급을 대체하게 되어 잉여 수도 감소가 비교적 적게 일어나는 것으로 분석하였다. 흥미로운 점은 그림에도 불구하고 시나리오 1, 2 모두 용수사용량이 높은 시간에 각각 0.1, 0.2 내외의 낮은 RI 및 MRI 값을 보인다는 점이다. 이러한 현상은 네트워크 전체적으로 낮은 수준의 복원력을 보이는 것과 동시에 일부 절점에서 음수의 지수값, 즉 최소요구수도에 못 미치는 결핍수도가 나타나고 있음을 의미한다. 이와 같이 시나리오 2의 적용 결과를 통해, 주선의 폐쇄

로 인한 공급경로 제한에 따른 시스템의 에너지 공급 효율 및 복원력 변화 양상을 분석할 수 있다.

### (3) 대규모 화재발생(시나리오 3)

시나리오 3에서는 특정 시점에서의 화재 발생으로 인한 순간적인 수요량의 증가를 모의하였다. 따라서 화재 발생시각인 19시를 제외한 나머지 시간대의 신뢰도 지수 값은 모두 동일하며, 발생 시점에서 RI 값은 0.315에서 0.105, MRI 값은 0.295에서 0.103, EI 값은 0.669에서 0.556으로 각각 감소하는 것으로 나타났다. 이는 일부지역에서 발생한 화재로 인한 용수 사용량 증가가 시스템 전반에 걸쳐 손실 에너지의 증가를 야기하고, 따라서 잉여 에너지가 감소하기 때문이다. 이 때, 19시에 대한 각 신뢰도 지수의 감소는 시나리오 1과 비슷한 규모로 일어나는 것을 알 수 있는데, 시나리오 3의 경우 시나리오 2와 같이 네트워크의 일부 지역에만 영향을 미침에도 불구하고 이렇듯 큰 감소 규모를 보이는 이유는 화재 발생지역이 매우 밀집되어 있고, 평상시 용수사용량에 비해 월등히 큰 사

**Table 1.** Comparison of system reliability index value

Index	Index value (Reduction rate,%)								
	Base condition (24-hr average)	Scenario 1 (24-hr average)		Scenario 2 (24-hr average)		Scenario 3 (at 19:00 only)			
RI	0.639	0.554	(-13.3)	0.603	(-5.6)	0.315	→	0.105	(-66.8)
MRI	0.612	0.528	(-13.8)	0.575	(-6.1)	0.295	→	0.103	(-65.0)
EI	0.824	0.784	(-4.9)	0.807	(-2.0)	0.669	→	0.556	(-17.0)

용량이 요구되기 때문에 시나리오 2보다 손실 에너지가 크게 발생하기 때문이다. 시나리오 3의 경우 특정 시점에서만 발생한 공급부하 상황이므로, 해당 시간에서의 신뢰도의 공간적인 분포 변화 양상을 상세히 분석하여 3.3.2절에 제시하였다.

Table 1을 통해 각 신뢰도 지수의 전반적인 변화를 정량적으로 파악할 수 있다. 시나리오 1의 공급부하 상황이 시나리오 2를 적용한 경우보다 시스템의 복원력이 크게 감소하였으며, 산정 지수별로 비교하면 EI 보다는 RI 및 MRI의 변화가 상대적으로 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

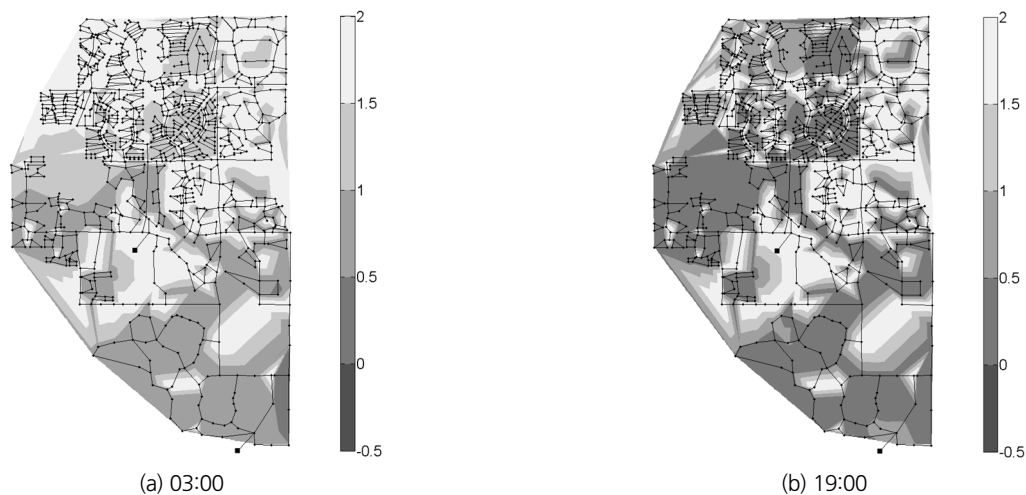
**3.3.2 신뢰도의 공간적 분포(MRI 방법에 의한 절점 복원력)**

MRI의 경우, 타 신뢰도 지수와 마찬가지로 시스템 전체의 복원력을 산정하기 위해 개발된 지수이지만, 절점에서의 에너지 구성만을 고려하므로 절점 별 복원력을 산정하는 것이 가능하다. 본 장에서는 각 절점의 MRI를 산정하고, 그 구체적인 분포 현황을 등가곡선의 형태로 상수관망 위에 도시하였다. 기본상태(Base condition)의 절점별 복원력 분포는 Fig. 7과 같이 나타났으며, 하루 중 용수사용량이 가장 적은 시간(03시)과 가장 많은 시간(19시)을 비교하였다. 시스템 복원력에서 분석한 바와 같이 용수 사용량이 높은 시간대에 복원력이

더 낮은 것을 알 수 있다. 하지만 용수 사용 패턴과 관계없이, 네트워크 내 절점별 복원력의 격차가 크고, 일부 절점에서는 복원력이 매우 낮은 상황임을 알 수 있다. 이처럼 복원력의 공간적 분포를 도시함으로써 앞서 시스템 복원력의 비교 분석에서 나타난 복원력의 증가/감소 현상이 구체적으로 어느 절점을 중심으로 발생하였는지 파악하는 등 상수관망 내 에너지 흐름을 상세히 분석할 수 있다. 시나리오 1의 경우 네트워크 전체에 걸쳐 용수 사용량이 증가하기 때문에 용수 공급의 편중 및 특정 관로에서의 송수량 증가와 같은 특징이 나타나지 않는다. 따라서 네트워크 전반적으로 복원력이 균등하게 감소하는 것으로 나타났으며, 용수의 흐름과정은 기존과 유사한 결과를 보이므로 이에 대한 구체적인 비교, 분석은 생략하였으며, 그 밖에 시나리오 2, 3의 분석 결과는 아래와 같다.

**(1) 관로의 구간 폐쇄(시나리오 2)**

시나리오 2를 적용한 상태에서의 19시의 절점별 복원력(MRI<sub>i</sub>)은 Fig. 8(b)와 같다. 기본 상태와의 비교를 위해 동일시간의 절점별 지수값의 편차를 계산하였으며, 해당 결과는 Fig. 8(c)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 특정 지역에서 복원력이 눈에 띄게 감소하였음을 확인할 수 있다. 즉, 폐쇄된



**Fig. 7.** Spatial distribution of MRI under base condition

관로를 대신해 용수를 공급하는 관로의 후단 절점에서 복원력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 때, MRI는 앞서 설명한 바와 같이 절점에서의 최소요구 에너지에 대한 잉여 에너지의 비율이며, MRI 값이 약 0.5~1.0 가량 감소하는 것은 기본 상태에서 잉여 에너지가 충분하지 않을 경우 최소요구 에너지를 충족시키지 못할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 앞서 살펴본 시스템 전체의 MRI 값이 크게 감소하지 않은 것과는 달리 특정 절점에서는 안정적인 용수공급이 이루어질 수 없음을 의미한다. Fig. 8(b)에 도시된 바와 같이 공급량이 일시에 늘어난 대체관로를 기점으로 음수의 지수값이 나타나고 있으며, 시스템 복원력 분석에서 예상한 바와 같이 결핍수두가 나타나고 있음을 한눈에 파악할 수 있다. 또한, 폐쇄된 주 관로의 인근 절점에서 미소하게 지수값이 증가한 것을 알

수 있으며, 이는 평상시 주변 지역에 공급하던 용수를 관 폐쇄로 인해 더 이상 공급하지 않게 되면서 해당 절점까지의 손실 에너지가 감소하였기 때문이다. 이와 같이 신뢰도의 공간적 분포를 파악할 경우, 보다 정확한 분석 및 대책마련이 가능함을 알 수 있다.

(2) 대규모 화재발생(시나리오 3)

시나리오 3을 적용한 상태에서의 19시의 절점별 복원력은 Fig. 9(b)와 같으며 화재가 발생한 주변 지역으로 짙은 색으로 표시된 부분이 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 9(c)를 통해 화재 발생지역 인근의 복원력이 1.0 이상 크게 감소하였음을 알 수 있으며, 동시에 화재 발생지역을 거쳐 용수를 공급받는 하류 절점의 복원력까지 함께 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 일

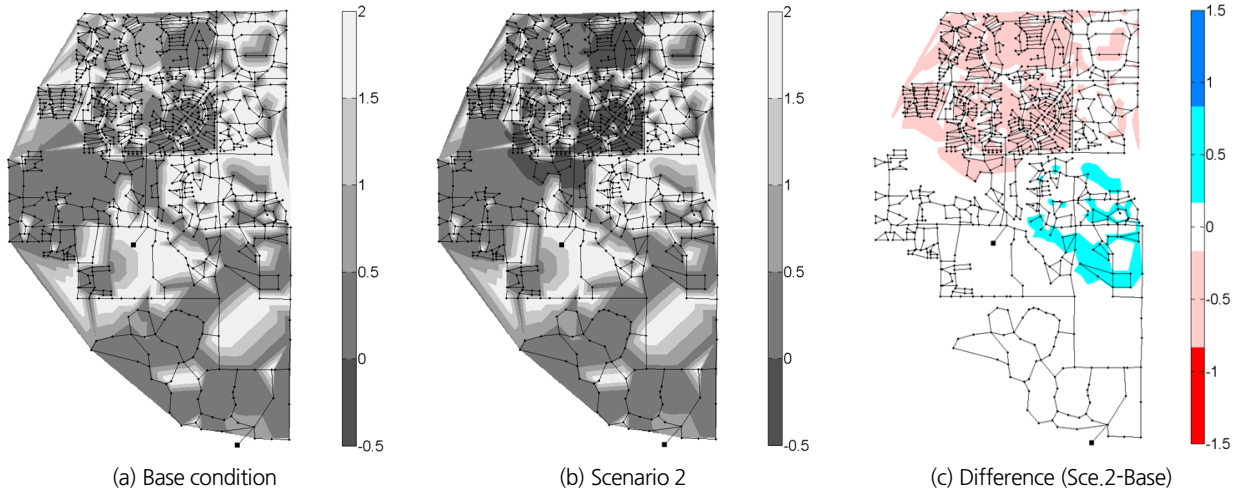


Fig. 8. Nodal MRI comparison at 19:00 (Scenario 2 vs. Base condition)

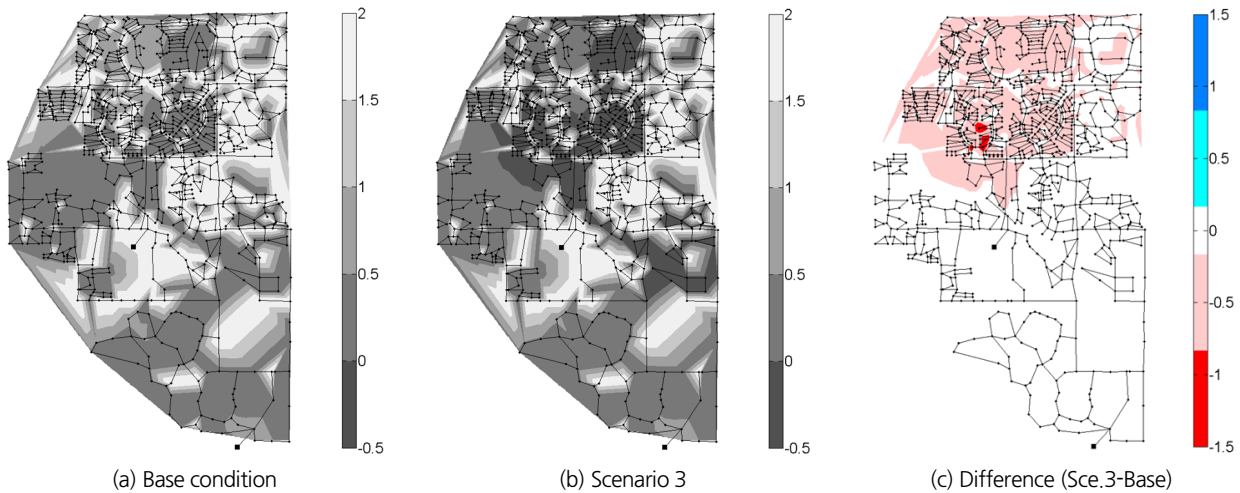


Fig. 9. Nodal MRI comparison at 19:00 (Scenario 3 vs. Base condition)

부 지역에서의 손실 에너지가 증가할 경우, 용수흐름 상, 하류에 위치한 공급 절점의 복원력까지 연쇄적으로 감소될 수 있음을 의미하며, 이와 같이 절점에서의 최소요구 에너지를 초과하는 수준으로 에너지가 크게 감소할 시 복원력 감소 지역이 실제 공급부하 지역보다 수 배 이상 크게 확대될 수 있음을 보여준다. 이처럼 신뢰도의 공간적 분포를 상수관망 위에 나타낼 경우, 복원력의 감소 지역 및 규모를 구체적으로 파악하여 상수관망의 안정적인 설계 및 운영에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

최근 상수관망 분야에서는 수리학적 안정성을 통한 용수 공급 신뢰도를 평가하기 위해, 용수 공급량 및 용수의 공급 수압을 동시에 고려할 수 있는 에너지 기반의 신뢰도 평가 기법이 활발히 활용되고 있다. 상수관망 내에서의 에너지 분포는 크게 Input energy, Loss energy, Output energy로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 에너지 분포를 고려한 신뢰도 정량화 지수 중 몇 가지를 선정하고, 가상의 네트워크를 통해 적용하였다. 이 때, 상수관망의 용수 공급 능력이 저하되는 상황에서 신뢰도 지수의 변화를 살펴보기 위해 일시적인 수요량 증가, 일부 관로의 폐쇄, 화재 발생 등의 시나리오를 모의하였다. 특히, 용수 사용량에 따른 지수 값의 변화를 상세히 분석하기 위해, 물 수요 패턴을 적용하여 시간적 변화 양상을 분석하였으며, 또한 신뢰도 정량화 지수 중 절점별 정량화가 가능한 MRI를 활용하여 복원력의 공간적 분포를 비교, 분석하였다.

신뢰도 지수의 시간적 변화 양상을 비교 분석한 결과, 네트워크 전반에 걸쳐 용수 사용량이 15% 증가하는 시나리오 1의 경우 RI, MRI, EI 값이 평균적으로 각각 13.3, 13.8, 4.9% 감소하는 것으로 나타났으며, 주요 관로가 파손되어 공급경로 일부가 제한되는 시나리오 2의 경우 RI, MRI, EI 값은 평균적으로 5.6, 6.1, 2.0% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 화재 발생으로 일부 절점에서의 수요량이 급격히 증가하는 시나리오 3의 경우, 화재 발생시각에 순간적으로 RI, MRI, EI 값이 66.8, 65.0, 17.0% 감소하는 결과를 보였다. 이러한 신뢰도 지수의 감소는 손실 에너지가 증가하여, 절점에 공급되는 잉여 에너지가 감소하기 때문인 것으로 분석하였다. 그러나 증가된 손실수두가 공급원 간의 수두 차이보다 크게 나타나는 경우, 일부 절점의 용수 공급원이 바뀌거나, 공급 경로가 변경되어 일부 지역의 용수공급 상황이 오히려 향상되는 경우도 발생하였다. 본 연구에서는 기존 복원력 지수인 MRI 산정방식을 응용

하여 절점별 MRI 값을 산정하고, 공간적인 분포를 비교하여 시나리오에 따른 구체적인 복원력 감소 지역 및 규모를 파악하였다. 시나리오 2의 경우, 시스템의 평균 복원력 지수 산정 결과에서는 두드러진 복원력 감소를 발견할 수 없었지만, 공간적인 분포도를 도시해본 결과 주 관로의 폐쇄로 인해 공급 경로가 변경되어 용수공급이 불안정한 절점이 다수 발생하는 것을 알 수 있었다. 시나리오 3에서는 화재 발생지역을 기점으로 하류 지역까지 복원력이 크게 감소하는 것을 파악할 수 있어, 주변 지역의 복원력에 미치는 영향 및 그 경계를 보다 정확히 분석할 수 있었다.

상수관망의 신뢰도 및 복원력 지수는 시스템의 설계 및 운영을 위한 정량적 지표로 활용되고 있으며, 각각의 복원력 지수는 물 공급 상황에 따라 다양한 변화 양상을 보였다. 본 연구에서는 다양한 신뢰도 지수를 함께 산정하고, 비교함으로써 상황별 시스템의 안정성을 파악하였다. 또한, 절점별 복원력 지수 산정을 통해, 시스템의 신뢰도 변화 요인을 손쉽게 파악할 수 있으며, 더 나아가 예측하기 어려운 지엽적인 위험을 분석할 수 있었다. 이와 같은 신뢰도 평가 모의는 향후 PDA (Pressure Driven Analysis)기반에서 수행함으로써 보다 현실적인 수리해석모의가 가능할 것으로 기대되며, 향후 대규모 네트워크를 대상으로 사례연구를 진행하고, 절점의 에너지를 기반으로 한 신뢰도 지수 이외에 관로에서의 신뢰도 지수를 동시에 고려하여 상수관망의 신뢰도 평가 기법을 개선하고자 한다.

## 변수설명

$T$	전체 모의시간
$\Delta t$	모의 간격
$n_{source}$	시스템 내 공급원의 수
$n_{pump}$	시스템 내 펌프의 수
$n_{pipe}$	시스템 내 관로의 수
$n_{node}$	시스템 내 절점의 수
$E_{input}$	외부로부터 시스템에 공급된 총 에너지
$E_{source}$	공급원으로부터 시스템에 공급된 에너지
$E_{pump}$	펌프에 의해 시스템에 공급된 에너지
$E_{loss}$	시스템 내에서 손실된 총 에너지
$E_{friction}$	시스템 내에서 손실된 마찰 에너지
$E_{leak}$	시스템 내에서 소실된 누수 에너지
$E_{output}$	시스템으로부터 절점에 공급된 총 에너지
$E_{ele}$	시스템으로부터 절점에 공급된 표고 에너지
$E_{min}$	시스템으로부터 절점에 공급된 최소요구 압력 에너지

$E_{surp}$	시스템으로부터 절점에 공급된 과잉 에너지
$E_{req}$	시스템으로부터 절점에 공급된 최소요구 에너지
$Q_{source,j}$	$j$ 번째 공급원으로부터 공급된 유량
$Q_{pump,i}$	$i$ 번째 펌프를 통과한 유량
$Q_i$	$i$ 번째 관로의 유량
$Q_{leak,i}$	$i$ 번째 관로에서 소실된 유량
$q_j$	$j$ 번째 절점의 수요량
$H_{source,j}$	$j$ 번째 공급원의 총 수두
$H_{pump,i}$	$i$ 번째 펌프의 양정고
$H_{loss,i}$	$i$ 번째 관로에서의 손실수두
$H_i$	$i$ 번째 관로 내 총 수두
$H_{cle,j}$	$j$ 번째 절점의 표고
$H_{min,j}$	$j$ 번째 절점의 최소요구 압력수두
$H_{surp,j}$	$j$ 번째 절점의 과잉 압력수두
$H_{tot}$	절점에서의 총 수두
$H_{req}$	절점에서의 최소요구수두
$\gamma$	물의 단위중량

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17AWMP-B083066-04).

## References

- Atkinson, S., Farmani, R., Memon, F. A., and Butler, D. (2014). "Reliability indicators for water distribution system design: comparison." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 2, pp. 160-168.
- Baños, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C., and Márquez, A. L. (2011). "Resilience indexes for water distribution network design: a performance analysis under demand uncertainty." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 10, pp. 2351-2366.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., and Cabrera Jr, E. (2010). "Energy audit of water networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 6, 669-677.
- Creaco, E., Fortunato, A., Franchini, M., and Mazzola, M. R. (2014). "Comparison between entropy and resilience as indirect measures of reliability in the framework of water distribution network design." *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 379-388.
- Di Nardo, A., Greco, R., Santonastaso, G. F., and Di Natale, M. (2010). "Resilience and entropy indices for water supply network sectorization in district meter areas." *In Proceedings of International Conference on Hydroinformatics*, Tianjin, China.
- Dziedzic, R. M., and Karney, B. W. (2014). "Energy Metrics for Water Distribution System Assessment."
- EPANET2 User's Manual (2000). *United States Environmental Protection Agency*.
- Farmani, R., Walters, G. A., and Savic, D. A. (2005). "Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 3, pp. 161-171.
- Greco, R., Di Nardo, A., and Santonastaso, G. (2012). "Resilience and entropy as indices of robustness of water distribution networks." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 14, No. 3, pp. 761-771.
- IPCC (2008). *Climate change and water*. IPCC Technical Paper IV, 200, UNEP.
- Jayaram, N., and Srinivasan, K. (2008). "Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 1, W01417.
- MATLAB User's Manual (2000). *The MathWorks, Inc.*
- Ministry of Public Safety and Security (2015). *NFSC 109*
- Prasad, T. D., and Park, N. S. (2003). "Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 1, pp. 73-82.
- Raad, D. N., Sinske, A. N., and Van Vuuren, J. H. (2010). "Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design." *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 5, W05524.
- Reca, J., Martínez, J., Banos, R., and Gil, C. (2008). "Optimal design of gravity-fed looped water distribution networks considering the resilience index." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 3, pp. 234-238.
- Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach." *Urban Water*, Vol. 2, No. 2, pp. 115-122.