재해에 대비한 수자원 시스템의 지속가능성 및 복원성에 관한 연구

Water Resources Infrastructure: Sustainability and Resilience

강두선* · 김태웅** · 안재현***

Kang, Doosun · Kim, Tae-Woong · Ahn, Jae-Hyun

Abstract

This paper sets forth key concepts and advances working definitions for sustainable and resilient infrastructures (S&R-Infra), specifically for water systems. Three water infrastructure scales, such as large, medium, and small scales are considered, each of which is represented by water resource system, regional water and wastewater infrastructure, and local water distribution system, respectively. All three scales are interconnected each other since water travels from sources to end users and returns the other way. This study is beneficial by suggesting indicators to evaluate system sustainability and resilience against outer disturbances. After S&R definitions and potential indicators are provided, application examples are examined to demonstrate the applications of the proposed indicators. Application results show that the proposed indices are useful for quantifying water system performance. While the approach is refined and applied to synthetic cases, it may be considered applicable to real-world systems as system performance indicators and/or system planning and design goals within an optimization framework.

Key words : Sustainability, Resilience, Reliability, Vulnerability, Water supply infrastructure

요 지

본 연구에서는 예기치 않은 재해에 대비한 물 공급 수자원 시스템의 재해대비성에 대한 지표로서 시스템의 지속가능성(sustainability)과 복원성(resilience)을 (이후, S&R) 산정하는 방안을 제안하였다. 물 공급 시스템을 크게 세 가지 규모(scale)로 구분하였는데, 1) 대규모 시스템은 수계 단위의 수자원 시스템을 의미하며, 2) 중규모 시스템은 권역별 상·하수 및 송·회수 시스템을 나타내고, 마지막으로 3) 소규모 시스템은 지역별 물 배분 시스템을 의미한다. 제안된 정량화 지표를 간단한 수자원 시스템에 적용, 그 활용가능성을 살펴보았으며, 향후 대규모 실제 시스템에 적용하여 재해에 대비한 시스템의 기능 평가/검증 및 설계에 활용이 가능할 것으로 판단된다. 지금까지 개념적으로만 소개되었던 지속가능성과 복원성에 대한 정량화된 지표를 제시함으로써, 기존 물 공급 시스템의 장래 지속가능성 검증, 재해 및 사고에 대한 복원가능성을 판단하는 지표로 활용이 가능하며, 또한 새로 구축하고자 하는 시스템의 계획 및 설계에 있어서는 최적화기법등의 목적함수로 활용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 지속가능성, 복원성, 신뢰성, 취약성, 물 공급 수자원 시스템

1. 서 론

1.1 연구배경

수자원 부족량은 한정되어 있는 반면, 급격한 인구증가와 더불어 기후변화로 인한 빈번한 가뭄재해로 인해 세계적으로 많은 지역이 물 부족 현상을 겪고 있거나, 가까운 미래에 겪게 될 것으로 예상된다. 따라서, 장기적으로 활용가능한 수자원의 확보는 대단히 중요한 이슈가 되고 있으며, 이러한 현상을 반영하듯이 21세기는 물 산업이 국가 핵심 산업으로 조

명되고 있다. 가뭄재해에 의한 물 부족현상을 미연에 방지하기 위해 다양한 방법으로 대비하고 있지만, 그러한 대책들이 과연 장기적으로 지속가능한 대책인지, 외부의 변화에 내구성이 있는지, 또한 우리가 예상한 범위를 넘어선 재해가 발생하였을 경우에 다시 원래의 상태로 복원이 가능할 것인지(가능하다면 얼마나 빨리 복원될 것인지)에 대한 명쾌한 해답을 줄 수 있는 분석방법이 필요하다. 용수 공급 시스템은 인간의 활동에 필수불가결한 물을 수요자에게 공급하는 사회기반시설로서 재해에 대비한 철저한 계획이 필요하며 아울러

*정회원. 수원대학교 토목공학과 조교수 (E-mail: doosunkang@gmail.com)

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

**교신저자. 정회원. 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 부교수(Tel: +82-31-400-5184, Fax: +82-31-436-8170, E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***정회원, 서경대학교 토목건축공학과 부교수

Member. Associate Professor, Department of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University

우리가 구성한 시스템이 다양한 외부상황에 적절히 대응하는지의 여부를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 물 공급 시스템의 성능시험을 위한 정량적인 지표(index)로써 지속가능성(sustainability) 및 복원성(resilience) (S&R)의 수리학적 지표를 제안하고, 제안된 지표를 물 공급 시스템에 적용하여 그 활용가능성을 검증하였다. 본 연구에서 제안된 지표는 향후 각종 수자원시스템의 성능 검사 (performance evaluation) 및 시스템의 계획 및 설계 (system planning and design)에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 기존연구

미국 National Science Foundation(NSF)의 Resilient and Sustainable Infrastructure(RESIN) program에서는 다음과 같이 사회기반시설의 복원력(resilience)과 지속가능성(sustainability)을 정의하였다. “회복력이 우수한 사회기반시설은 자연적, 인위적 외부요인에 신속히 대응하여 원래의 상태로 복원이 빠르다. 지속가능한 시스템은 장기간동안 시스템 본연의 기능을 수행할 수 있으며 재생가능한 에너지와 재료들을 사용하여 자연을 보전하고 재생할 수 있도록 한다”(National Science Foundation, Directorate for Engineering, Emerging Frontiers in Research and Innovation, EFRI -2008 Program Solicitation NSF 07-579). 수자원 시스템의 지속가능성 평가에 대한 연구는 꽤 오랜 역사를 가지고 있으며, 아래에 그 중 대표적인 연구들을 요약하였다. Hashimoto et al. (1982)는 저수지 운영 방안의 적정성을 판단하기 위한 지표로써, 신뢰성(reliability), 복원성(resilience), 그리고 취약성(vulnerability) 등 세 가지 정량화 지표(RRV indicators)를 제안하였다. 그들의 연구는 수자원 분야에 정량화 지표를 적용한 첫 번째 연구로써 이 후 다양한 연구들이 이들이 제안한 RRV 지표의 개념을 다양한 수자원시스템의 지속가능성 정량화에 활용하였다. 대표적인 연구를 소개하면; Lane et al. (1990)과 Fowler et al. (2003)은 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 정량화 한 바 있고, Vogel et al. (1999), Kjeldsen and Rosbjerg (2004)은 저수지 운영 시스템에 적용하였고, Kay (2000), Blackmore and Plant (2008) 등은 도시 물 공급시스템의 운영에 적용하였으며, Cai et al. (2002), Sandoval-Solis et al. (2011) 등은 수자원 관리 정책의 적정성을 판단하는 기준으로 이들 지표를 활용한 바 있다. 그 밖에도, Maier et al. (2001)은 하천시스템의 수질향상 운영방안의 적정성 판단 기준으로 이들 지표를 활용하였다. Hashimoto et al. (1982)의 정의에 의하면, 시스템의 복원성(resilience)은 내·외부의 변화 요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하게 되었을 때, 얼마나 빠른 속도로 정상(혹은 정상에 가까운) 상태로 복원하느냐를 정량화한 지표이다. 시스템의 내구성(robustness)은 최악의 상황인 시스템의 전반적인 붕괴를 초래하지 않도록 외부요인의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 시스템의 유연성을 정량화한 지표이다. 마지막으로 지속가능성(sustainability)은 현재와 미래의 세대에 필요한 만큼의 양질의 자원을 공급할 수 있는 능력을 의미한다.

1.3 연구목적

정리한 바와 같이, Hashimoto et al. (1982)의 연구 이후 SRRV 지표(Sustainability, Resilience, Robustness and Vulnerability indicators)에 대한 다양한 정의와 그들을 정량화하기 위한 방법들이 제안되어왔다. 아울러, 정량화된 지수를 수자원 시스템의 계획과 운영에 다양하게 적용한 사례들이 발표되어 왔다. 본 연구에서는 수자원 시스템 중에서도 물 공급시스템의 성능 평가와 설계에 적용하기 위해 S&R의 정의를 새롭게 제시하고 정량화하는 방안을 제안하였다. 또한 물 공급 시스템을 크게 세 가지 스케일로 구분하여 시스템별 정량화 지수의 활용가능성을 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 선행 연구에서 제안되었던 S&R의 정의에 추가하여 다양한 수자원 시스템의 시간축과 시스템의 규모(scale)를 고려하고자 한다. 단기간(short-term)의 경우, 다양한 내·외부요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하게 되었을 때 효과적으로 시스템이 재가동되어 서비스를 지속할 수 있는 시스템의 복원력에 초점을 맞추고, 중·장기간(medium & long-term) 시스템의 계획에 있어서는 시스템의 지속가능성, 수자원의 장기적인 확보가능성에 기반한 정량화 지표를 제안하고자 한다.

2. 물 공급 시스템

본 연구에서는 일반적인 물 공급/운영 시스템을 크게 3가지의 규모로 구분하여 규모별 지표의 산정방안을 제안하였으며, Fig. 1에 개략적인 모식도를 나타내었다.

- 1) 좌측 시스템은 가장 규모가 큰 시스템으로 장기간 용수를 확보하여 공급하는 유역단위의 수자원시스템(water resources system)을 의미하고,
- 2) 중앙 시스템은 시·도별 상·하수, 송·회수 시스템(water transmission and sewer system)을 의미하며,
- 3) 우측 시스템은 블록단위의 급·배수 물 공급시스템(water distribution system)을 의미한다.

따라서 각각의 시스템은 용수의 취수원, 도·송수시스템, 최종 수요지점을 각각 의미한다고 해석할 수 있을 것이다. 좌측에서 우측시스템으로 이동함에 따라 시스템의 규모가 감소하고 대상지역도 축소됨을 알 수 있다. 무엇보다 중요한 점은 이들 세 시스템이 따로 분리되어 운영되는 것이 아니라 서로 연결되어 있다는 점인데, 물은 취수원으로부터 최종 소비자에게 전달이 되고, 사용되어진 용수는 적절한 처리과정을 거쳐 다시 환경으로 되돌려지기 때문이다.

수자원시스템(좌측 시스템)의 경우 다양한 취수원 - 즉, 하천수, 지하수, 댐용수, 수입용수 등 - 을 포함한 가장 규모가 큰 시스템으로 물 수지분석(water mass balance)을 통한 수량해석이 주를 이룬다. 지역단위의 중규모 상·하수 인프라 시스템(중앙 시스템)의 경우 좌측 시스템으로부터 취수한 용수를 우측 시스템으로 공급하거나, 반대로 우측 시스템에서 발생한 하수를 처리하여 좌측 시스템으로 되돌리는 역할을 하는 시설물을 의미한다. 따라서 이러한 시스템은 상·하수 처리시설, 대규모 송수관, 하수관 등으로 구성되어 있다. 마

지막으로 소규모 급·배수 관망시스템(오른쪽 시스템)의 경우 중, 소블럭 규모의 상수관망시스템, 하수채집시스템을 의미하며, 비교적 상세한 수리 및 수질분석이 이루어진다.

3. S&R의 정의 및 정량화지수

3.1 지속가능성(Sustainability)

수자원 분야에서 지속가능성이란, 장기간 필요한 양의 양질의 수자원을 확보할 수 있는 능력으로 정의가 가능하다. 따라서 종종 수자원의 지속가능성은 Fig. 1의 세 가지 스케일 중 가장 규모가 큰 왼쪽 시스템에 적용하여 설명되는 경우가 대부분이다. 도시화로 인해 수요지점이 지역적으로 편중되어 수량이 증가하고, 기후변화로 인한 가뭄발생이 빈번한 상황에서 장기적인 수자원의 공급가능성(a long-term sustainable water supply)에 대한 관심은 그 어느 때보다 높다. 본 연구에서는 수자원의 지속가능성을 정량화하기 위한 세부지표 4가지를 아래와 같이 제안하였다.

3.1.1 신뢰도(Reliability)

신뢰도는 시스템이 주어진 기간 동안 정상적으로 제 기능을 발휘할 수 있는 가능성 또는 확률로 정의될 수 있으며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Re = \frac{N_S}{N} \quad (1)$$

여기서, N 은 총 분석년수, N_S 는 분석기간 중 시스템이 정상적으로 기능을 발휘한 년수를 각각 의미한다.

3.1.2 복원력(Resilience)

복원력은 시스템이 내·외부적인 간섭에 의해 제 기능을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 발생하였을 때(예, 가뭄으로 인한 원수확보 어려움, 상수처리시설의 오작동 혹은 고장 등), 얼마나 신속하게 정상적인 상태(즉, 정상적인 용수공급)로 복원이 가능한가를 나타내는 지수이며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Rs = \frac{X_F}{N_F} \quad (2)$$

여기서, X_F 는 분석기간 동안 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하는 사고(event)의 발생횟수, N_F 는 분석기간 중 시스템이

정상적으로 기능을 발휘하지 못한 년수를 각각 의미한다($N_F = N - N_S$). 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이, 복원력의 역수는 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하는 상태에서 다시 정상상태로 복원되는데 걸리는 평균적인 시간을 의미한다.

3.1.3 취약도(Vulnerability)

취약도는 시스템이 기능을 상실하였을 경우, 그 실패의 정도(magnitude of failure)를 나타내는 지표이며 식 (3)과 같이 정량화 할 수 있다. 용수 수요자의 입장에서 물 공급 시스템의 취약도는 수요자가 필요로 하는 용수를 제때 공급받지 못했을 경우, 그 부족량에 해당한다고 할 수 있다. 반대로 용수 공급자의 입장에서는 가용한 수량이 감소할 경우 시스템이 기능을 상실하는 것으로 판단할 수 있다.

$$Vul = \min_{t \in T} \left[1 - \frac{S_t}{D_t} \right] \quad (3)$$

여기서, T 는 총 분석기간을 의미하고, S 와 D 는 각각 특정년도의 용수부족량과 용수수요량을 나타낸다. 취약도는 과거에서부터 취약도가 계산되어지는 시점까지의 최소값으로 나타내어지므로, 그 값이 증가할 수는 없다. 즉, 현재까지 발생했던 가장 취약했던 정도, 다시 말해서, 해당 시스템이 내포하고 있는 최악의 실패정도를 의미한다고 할 수 있다.

3.1.4 지속가능성(Sustainability)

마지막으로, 시스템의 지속가능성은 위에서 계산된 세 개의 지수를 통합하여 계산할 수 있다. 즉, 앞서 계산한 신뢰성, 복원력, 취약도를 모두 고려하여 시스템의 지속가능성 지수를 정량화 할 수 있으며 식 (4)와 같은 식들이 이용될 수 있다.

$$S = Re * Rs * Vul \quad (4a)$$

$$S = W1 * Re + W2 * Rs + W3 * Vul \quad (4b)$$

여기서, $W1$, $W2$, $W3$ 는 가중치를 의미하며 세 가중치의 합은 1이 되어야 한다. 가중치의 선정은 주관적이며, 분석하고자 하는 시스템의 목적에 따라 의사결정자가 임의로 결정하도록 한다. 참고로, 위에서 제안된 지수들은 모두 0에서 1사이의 값을 갖게 되며, 지수값이 1에 가까울수록 시스템이 제 기능을 수행한다고 할 수 있다.

3.2 복원력(Resilience)

물 공급 시스템 (water supply infrastructure)의 복원력은 시스템의 내·외부적인 간섭(disturbances)에 저항하여 시스템 본래의 기능을 수행하는 능력 혹은 시스템의 기능을 상실할 만큼 큰 외부충격이 가해졌을 경우, 그 기능을 회복하는 능력 혹은 회복기간을 의미한다고 할 수 있다.

4. 적용 결과 및 분석

4.1 지속가능성의 적용 예

수자원의 지속가능성은 앞서 정의한 바와 같이 수요자가 필요로 하는 양질의 용수를 장기간 지속적으로 공급할 수 있

Fig. 1. Water system planning scales

Fig. 2. Sources and uses of Anytown water supply system

는 시스템의 능력으로 정의된다. 이와 같은 수자원의 지속가능성을 정량화 할 수 있는 지수들을 제안하였으며 제안된 지수들을 간단한 적용 예를 통하여 살펴보았다. Fig. 2는 Anytown의 물 공급 시스템 개략도이다. Anytown은 가상의

시스템으로 총 세 개의 수요자로 구성이 되며(즉, 생활용수, 농업용수, 그리고 산업용수), 이들 용수는 댐으로부터 공급이 되고 있다. 향후 100년간의 물 공급 시뮬레이션을 위해 다음과 같이 변수값을 가정하여 각각 수요량과 공급량을 구성하였다. 생활용수의 산정을 위해 인구증가율은 1.5%, 그리고 1인당 물 사용량은 350 lpcd로 일정하게 가정하였다. 농업용수는 매년 3%씩 감소하고, 반면 산업용수는 매년 3%씩 증가하는 것으로 가정하였다. 2030년부터 생활용수의 10%, 산업용수의 15%를 의무적으로 중수도를 이용하여 공급하도록 하고, 생활하수를 고도처리한 후 취수원인 댐으로 방류하여 재활용하도록 의무화하였다.

Fig. 3은 위의 변수값을 기초로 발생된 수요량과 공급량 데이터를 이용하여 Anytown 댐의 100년간 물수지 분석을 수행한 결과이다. 좌측의 그래프는 연도별 물수지 분석 결과를 나타내고, 우측의 그래프는 그 누적값이다. 본 예제에서는 댐의 저류용량을 무한하다고 가정하고, 따라서 모든 수요지점에 물 공급이 100% 이루어지는 것으로 가정하였다. 그러므로 각 수요지점의 신뢰성, 복원성, 취약성, 지속가능성은 모

Fig. 3. Annual and cumulative water mass balance for the Anytown reservoir

Fig. 4. Index parameters for the Anytown dam over 100 years

두 1의 값을 갖게 된다. 본 예제에서 정량화하고자 하는 값은 바로 취수원인 댐 용수의 연도별 지속가능성이다. 따라서, 댐으로의 하천유입량과 인공함양량이 댐 용수 사용량보다 많은 경우(즉, 수량이 증가하는 경우) 시스템이 정상적으로 운영되는 것으로 가정하고, 반대로 특정년도의 댐 유입량 보다 사용수량이 많을 경우, 시스템운영이 실패한 것으로 가정한다.

Fig. 4는 Anytown 댐의 향후 100년간 물 공급 지속가능성을 분석한 결과이다. 먼저 신뢰성(reliability)의 경우, 현재 댐 용수 사용량이 하천수의 유입량과 인공함양량보다 커서 신뢰성은 0의 값을 가지며, 그러한 추세가 2030년까지 지속된다. 이 후, 생활용수 및 산업용수의 중수도 재활용과 고도처리수의 댐 인공함양에 의해 신뢰성이 증가하고 2066년까지 지속된다. 이 후의 기간에는 인구증가에 따른 생활용수 및 산업용수의 증가로 인해 다시 신뢰성은 감소하게 된다. 시스템의 복원성(resilience) 또한 신뢰성과 유사한 양상을 보이는데, 2030년까지는 계속해서 댐의 저수용량이 감소하므로 복원력은 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 2030년 이후 공급원의 다원화와 댐 용수 인공함양의 효과로 시스템의 복원력은 증가하지만, 2066년 이후 수요량의 증가가 공급가능량의 증가분을 초과하여 댐의 저수용량이 다시 감소하므로 시스템의 복원력 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 시스템의 취약성(vulnerability)은 현재로부터 계산 시점까지 시스템이 처했던 가장 극심한 상태를 의미하므로, 지수값이 증가할 수 없다. 초기에 발생했던 댐 수위의 저하가 처음 70년간 겪은 가장 극심한 조건이었다가 2080년 이후 수요량의 급격한 증가에 의해 댐 저수용량의 감소가 더욱 극심하게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 Anytown의 물 공급시스템은 초기 20년 동안은 현재상태를 그대로 유지한다는 가정하에서 지속가능하지 않은 것으로 나타났다. 이 후 중수도 재활용과 고도처리수를 이용한 용수확보를 통해 이 후 30년간은 원활한 물 공급이 이루어지나, 2080년 이후로는 수요량의 증가분이 공급량의 증가분을 초과하는 것으로 나타나 다시 용수부족을 겪을 것으로 판단된다. 따라서 새로운 공급원을 계획하거나, 수요량의 저감을 위한 대책을 적극 추진해야 할 것으로 판단된다. 새로운 대안의 실효성을 파악하기 위해서는 본 연구에서 제안된 지수들을 각각 대안별로 계산하여 여러 대안들 중 지속가능성이 가장 큰 대안을 선택할 수 있을 것이다.

4.2 복원력의 적용 예

물 공급 시스템의 복원력이란, 앞서 언급한 바와 같이, 시스템이 기능을 상실한 이후 얼마나 빨리 정상상태(혹은 정상상태에 근접한 상태)로 회복가능한지를 정량화한 지표이다. 이러한 시스템의 복원력은 처음 시스템의 설계 시 여유(redundancy)를 고려한 설계를 통해서 향상될 수도 있고, 혹은 재난발생시 시스템의 적절한 운영을 통해서도 향상시킬 수 있다. 이러한 시스템의 복원력 개념이 상수도 관망 시스템의 설계 및 운영에 있어서 어떻게 적용이 되는지를 살펴보았다.

상수 관망 시스템의 일차적인 목적은 수요자가 필요로 하는 양의 용수를 적정수압을 유지하면서 공급하는 것이다. 이

러한 시스템의 기능을 저해하는 요인들은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 관의 파손을 통한 물 공급 저하를 고려하였다. 관의 파손 원인은 지진과 같은 극단적이고 시스템의 전반적인 붕괴를 초래하는 경우도 있지만, 관의 노후와 과도한 수압발생 등으로 인해 몇몇 지점에서 관이 파손되어 누수가 발생하는 경우가 대부분이다. 관이 파손되어 누수가 발생하였을 때, 시설관리처에서는 해당 관을 차단하고 빠른 시간 안에 파손된 관을 보수하거나 교체하여야 한다. 이러한 보수 혹은 교체기간 동안 파괴된 관에 연결된 사용자들은 물 공급을 받을 수 없게 된다. 주목할 사실은 파괴된 관에 연결된 수요자뿐만 아니라, 해당 관의 하류지점에 위치한 수요자들도 관의 연결 상태에 따라 물 공급이 끊길 수 있고, 혹은 물 공급이 이루어지더라도 증가된 수도손실에 의해 요구수압을 만족시키지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이 때, 관리본부에서는 시스템 전반에 걸쳐 요구수압을 만족시키기 위해서 가동되고 있지 않는 펌프를 추가로 가동할 수 있다. 이러한 추가적인 펌프가동에 의해 파손된 관을 제외한 나머지 수요자에게 적절한 수압을 유지할 수 있게 된다.

Fig. 5에 도시된 송수관로 시스템은 배수지로부터 연결된 3대의 펌프로부터 용수를 공급하고 있다. 6번 절점과 9번 절점 사이에 위치한 관이 파괴가 되어 누수가 발생하는 경우를 가정해보자. 누수신고가 접수되었을 때 가장 먼저 해야 할 일은 파괴된 관 부근에 위치한 밸브를 닫고 더 이상 누수가 발생하지 않도록 해당지역을 격리(isolation)하는 것이다.

Fig. 6은 격리된 지역의 하류지점에 위치한 절점 16에서의 시간에 따른 수압의 변화를 나타내고 있다. 상단 그래프는 관 파손 직후 아무런 추가 조치가 이루어지지 않았을 경우의 압력 변화를 나타내며 하단의 그래프는 배수지와 연결된 펌프장에서 작동하지 않고 있던 3번째 펌프를 추가로 가동하였을 경우의 같은 지점에서의 압력변화를 나타내고 있다. Fig 6에서 보여 지는 바와 같이, 관 파손이 발생한 13시부터 관 교체/보수가 이루어진 22시까지 평상시 펌프작동으로는 최소 요구수압인 15 m를 만족하지 못하지만, 추가 펌프가동에 의해 필요한 수압이 만족되어 용수공급에 아무런 문제가 없음

Fig. 5. Water transmission network with a pipe break

Fig. 6. System recovery via adaptive pump operations

Fig. 7. Schematic diagram of water distribution system recovery from pipe failure

을 알 수 있다. 따라서 펌프 추가 작동과 같은 적절한 시스템 운영에 의해 시스템의 기능을 일부 원상 복구할 수 있음을 알 수 있다(즉, 복원력 증가). 위와 같이 시스템의 복원력을 정량화하기 위한 방법으로 Fig. 7과 같은 방법을 제안하였다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이, T1 시간에 관 파손이 발생함과 동시에 시스템으로 전달되는 전체 공급량은 파괴된 관을 통한 누수(Q_{burst})에 의해 증가하게 된다. 하지만, 일부 수요자는 공급이 차단되어 전체 수요자에게 공급된 용수량($Q_{supplied}$)은 감소하게 된다. 일반적으로 관 파손이 발생하였을 경우, 관 파손지점을 발견하고, 적절한 밸브를 차단하여 지역을 격리하기 까지는 시간이 소요되며($T2-T1$), 밸브를 닫고 해당지역을 격리하는 순간($T2$), 누수는 더 이상 발생하지 않고, 시스템 전체 공급량도 감소하게 된다. 그리고 T3 시간에 파손된 관이 교체되거나 보수되기까지 ($T3-T2$) 시간 동안 시스템은 정상적인 기능을 발휘하지 못하게 된다. 이 때 앞서 살펴본 바와 같이 추가적으로 가동이 가능한 펌프를 작동시켰을 경우, 시스템 전체적으로 수압을 끌어올릴 수 있게 되어, 수압이 낮아 용수를 공급받지 못하던 수요자도 원활한 용수공급이 가능하게 되어 시스템 전체 공급량은 증가하게 된다.

Table 1. Water distribution system resilience analysis results

	Regular Pump Operation	Adaptive Pump Operation
System availability	0.99926	0.99943
Water shortage (m^3/yr)	10,745	8,252 ($\downarrow 2,493$)
Out-service hours (hrs/yr)	124	7 ($\downarrow 117$)
Pumping energy (MWh/yr)	2,493	2,508 ($\uparrow 15$)
Pumping cost (\$/yr)	273,132	274,721 ($\uparrow 1,589$)

따라서 그림에 음영으로 표시된 부분이 바로 적절한 시스템의 운영에 따른 시스템의 복원력 증가분을 정량화한 부분이라고 할 수 있으며, 이를 통상 용수공급의 유효성(availability)이라고 정의한다. 유효성은 시스템의 복원력(resilience)을 정량화하는 지수로 사용될 수 있다.

마지막으로, 해당 시스템에 일 년간 발생가능한 관 파손을 확률적으로 발생시켜 펌프운영과 시스템의 복원력의 관계를 모의하였으며, 그 결과를 Table 1에 수록하였다. 시스템의 유효성(availability)은 연간 실제 용수공급 가능량을 전체 용수 요구량으로 나누어서 계산한 값으로 유효성이 1인 경우는 일 년간 용수가 100% 공급되었음을 의미한다. 모의 결과를 요약하면, 추가 펌프 운영에 의해 연간 물 부족량은 약 2,493 톤 감소하였고, 단수시간도 117시간 감소하였음을 알 수 있다. 반면 추가로 펌프를 가동함에 따라 전기사용량과 펌프 운영비용이 증가하였으나, 그 정도가 크지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

재해에 대비한 물 공급시스템의 장기간 지속가능성과 시스템의 복원력을 평가하는 것은 시스템의 계획, 설계 및 운영에 있어서 중요한 사안이다. 하지만, 이러한 시스템의 특성을 정량화 하여 재해에 대비할 수 있는 분석법이 미흡한 실정이므로, 본 연구에서는 물 공급 시스템을 크게 세 가지 규모로 분류하고 시스템의 규모별로 적용할 수 있는 지속가능성과 복원성의 지표들을 제안하였다. 본 연구로부터 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지속가능성의 지표로 사용된 3가지 지수들(즉, 신뢰성, 복원력, 취약도)은 각각 재해의 발생 빈도(frequency), 기간(duration), 강도(intensity)를 적절히 반영하는 것으로 나타났다.
- 2) 이러한 지수들은 물을 공급하는 수자원(공급원) 측면에서의 지속가능성 뿐만 아니라, 물을 공급받는 수요측면에서의 지속가능성도 아울러 정량화 할 수 있다.
- 3) 또한, 시간에 따른 시스템의 지속가능성의 변화양상도 추정할 수 있다는 점이 선행연구와 차별되는 부분이라 할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 제안된 지표들은 여러 가지 설계 혹은 운

영 방안들 중에서 가장 적절한 대안을 선택하는 기준으로 활용될 수 있다. 즉, 다양한 대안들 중 수자원 공급의 지속가능성에 대한 정량적 판단기준으로 활용되거나, 최적화기법등을 활용한 시스템의 설계에 있어서 목적함수로 적용될 수 있다.

- 5) 물 공급 시스템의 복원력의 적용 예로서 상수 관망 시스템의 관 파손사고를 살펴보았다. 관 파손시 시스템의 적절한 운영을 통해 물 공급능력을 일부 향상시킬 수 있었으며 이를 정량화하는 방안을 제시하였다.
- 6) 이밖에도, 가뭄에 의해 지역별 물 공급이 원활하지 못할 경우, 시스템의 통합 운영을 통해 상대적으로 물 공급이 원활한 지역의 용수를 물 부족을 겪는 지역으로 공급할 수 있는 대안을 미리 계획하고, 효율적으로 운영하는데 본 연구 결과가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.
- 7) 마지막으로, 본 연구에서는 비교적 간단한 물 공급 시스템을 이용하여 제안된 방법들의 활용가능성을 살펴보았으나, 추후 연구에서는 실제 시스템에 적용함으로써 제안된 방안을 검증할 수 있는 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘국가 가뭄재해 상황관리 정보시스템 구축’ [NEMA-자연-2011-40] 과제의 성과입니다.

References

- Blackmore, J.M. and Plant, R.A.J. (2008) Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 134, pp. 224-233.
- Cai, X., McKinney, D.C., and Lasdon, L.S. (2002) A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. *Water Resour. Res.*, Vol. 38, No. 6, pp. 1-14.
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., and O’Connell, P.E. (2003) Modeling the impacts of climate change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resour. Res.*, Vol. 39, 11doi:10.1029/2002WR001778.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, Vol. 18, pp. 14-20.
- Kay, P.A. (2000) Measuring sustainability in Israel’s water system. *Water Int.*, Vol. 25, pp. 617-623.
- Kjeldsen, T.R. and Rosbjerg, D. (2004) Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *J. Hydrol. Sci.*, Vol. 49, No. 5, pp. 755-767.
- Lane, M.E., Kirshen, P.H., and Vogel, R.M. (1999) Indicators of impacts of global climate change on U. S. water resources. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 125, pp. 194-204.
- Maier, H.R., Lence, B.J., Tolson, B.A., and Foschi, R.O. (2001) First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Water Resour. Res.*, Vol. 37, pp. 779-790.
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D.C., and Loucks, D.P. (2010) Sustainability index for water resources planning and management. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 137, No. 5, pp. 381-390.
- Vogel, R.M., Lane, M.E., Ravindran, R.S., and Kirshen, P.H. (1999) Storage reservoir behavior in the United States. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 125, pp. 245-254.

© 논문접수일 : 2012년 11월 27일
 © 심사회의일 : 2012년 12월 03일
 © 심사완료일 : 2012년 12월 26일