

# 수자원시스템의 복원력이란?



**강두선** ●●●  
경희대학교 사회기반시스템공학과 교수  
doosunkang@gmail.com



**김중훈** ●●●  
고려대학교 건축사회환경공학부 교수  
jaykim@korea.ac.kr

시에 사회 전반적으로 시스템의 장기적인 마비를 야기할 수 있다. 지진에 의한 피해를 최소화하면서 최대한 빨리 시스템을 복구하여 원래의 기능을 회복하려는 노력이 필요한데, 이때 시스템의 복원력 개념이 요구된다. 시스템의 종류는 다양하며, 또한 시스템별로 영향을 미치는 요인 또한 다양하다.

사회기반시설의 하나인 수자원시스템은 인간의 활동에 필수불가결한 물을 다루는 시스템으로 재난 및 사고에 대비한 철저한 계획이 필요하며 아울러 우리가 구성한 시스템이 다양한 외부상황에 적절히 대응하는지의 여부를 평가할 필요가 있다. 즉, 시스템의 계획 및 설계 단계에서부터 발생 가능한 외부요인을 유추하여 해당 사고가 발생하였을 경우에 시스템이 원래의 상태로 복원이 가능할 것인지 (가능하다면 얼마나 빨리 복구가 가능할 것인지)에 대한 정량적인 분석이 이루어져야 할 것이다. 본 고에서는 복원력의 개념에 대해서 알아보고, 복원력을 정량화하기 위한 지표, 시스템의 복원력 향상을 위한 방안, 간단한 적용 예 등을 살펴보고자 한다. 정량화된 복원력 지표는 재해 및 사고에 대한 기존 시스템의 복원가능성을 판단하여, 필요하다면 보강방안을 평가하는 지표로 활용이 가능하며, 또한 새로 구축하고자 하는 시스템에서는 계획 및 설계과정에서 적절히 활용할 수 있을 것이다.

## 1. 서론

예기치 못한 재난 및 사고에 대비한 시스템의 대응능력을 평가하기 위한 지표로서 복원력(resilience)의 개념이 종종 사용된다. 간단히 정의하자면, 시스템의 복원력이란 시스템에 작용하는 내부 혹은 외부영향에 대응하여 해당 시스템이 붕괴되지 않고 원래의 상태로 복원, 시스템 본연의 기능을 지속할 수 있는 능력을 의미한다. 외부영향의 극단적인 예로 지진을 들 수 있는데, 지진에 의한 피해는 사회기반시설인 상하수도, 전력, 도로 및 교량 시스템 등과 같은 라이프라인(lifeline system)에 크게 나타날 수 있으며, 이러한 라이프라인의 파괴는 시설물 자체의 직접적인 손상과 동

## 2. 복원력의 정의

복원력(resilience)이라는 용어는 라틴어 “resilire”에서 기원하며, “재도약”의 의미를 갖는다. 즉, 주변의 저항에 일시적으로 시스템이 기능을 상실하였을 경우, 충격을 최대한 흡수하고 재정비를 통해 원래의 상태 (혹은 원래의 상태에 근접한 상태)로 회복하여 제 기능을 수행할 수 있는 능력을 의미한다. 미국 National Science Foundation (NSF)의 Resilient and Sustainable Infrastructure (RESIN) program에서는 다음과 같이 사회기반시설의 복원력을 정의하였다. “복원력이 우수한 사회기반시설은 자연적, 인위적 외부요인에 신속히 대응하여 원래의 상태로 복원이 빠른 시설을 의미한다.” 이 밖에도 여러 분야에서 복원력을 정의한 바 있으며, 대표적인 예는 다음과 같다. Bruneau et al. (2003)은 복원력이 강한 시스템을 외부저항에 의한 기능상실의 확률이 낮고, 설사 그 기능을 상실한다 하더라도 연쇄적인 파급이 적어 복구시간이 짧은 시스템이라고 정의하였다. 또한 복원력이 강한 시스템은 견고성(robustness), 잉여성(redundancy), 자원력(resourcefulness), 그리고 신속성(rapidity) 등의 네 가지 속성이 뛰어난 시스템이라고 정의하였다. 복원력과 상반되는 개념으로 취약성(brittleness)

이란 용어를 사용하며, 취약한 시스템은 외부저항에 취약하여 적응력이 낮은 시스템을 의미한다. Hashimoto et al. (1982)의 정의에 의하면, 시스템의 복원력은 내, 외부 변화요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하게 되었을 때, 얼마나 빠른 속도로 정상(혹은 정상에 가까운) 상태로 복원이 가능한가를 정량화한 지표이다. 다양한 내, 외부요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못하게 되었을 때 효과적으로 시스템이 재가동되어 서비스를 지속할 수 있는 시스템의 복구능력에 초점을 맞추고 있다고 할 수 있다.

복원력을 정의할 때, 내, 외부로부터 시스템에 작용하는 방해요소(disruption)를 언급하는데, 이때 작용하는 방해요인으로는 인적요소(운영자의 부주의), 자연적인 재해(가뭄, 홍수, 지진 등), 기계의 결함 등을 들 수 있다. 이러한 방해요인이 시스템에 작용하였을 때, 시스템은 일부기능을 상실하게 되고, 이러한 기능상실 및 복원의 단계는 [그림 1]에 보여 지는 바와 같이 대략 여덟 단계를 거치게 되는 것으로 알려져 있다: (1) 준비단계, (2) 방해요인의 발생 및 작용단계, (3) 초기반응단계, (4) 초기영향단계, (5) 전체영향단계, (6) 회복을 위한 준비단계, (7) 회복단계, 그리고 마지막으로 (8) 장기적인 영향구간으로 구분된다.

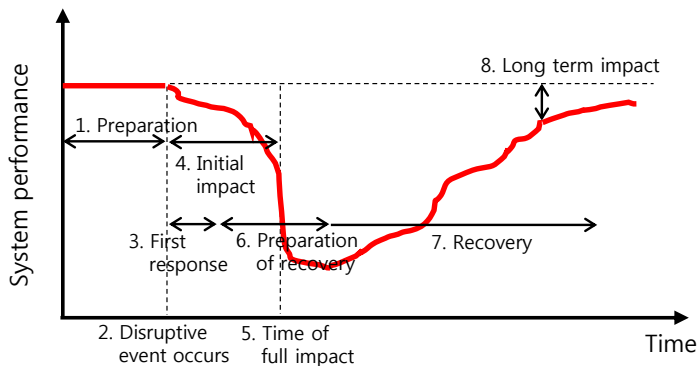


그림 1. 시스템의 기능상실과 그에 따른 복원의 단계, 출처: Sheffi (2005)

### 3. 복원력의 정량화

#### 3.1 복원력의 속성

Bruneau and Reinhorn (2007)은 시스템의 복원력을 다음과 같은 네 가지 속성을 이용하여 정량화할 수 있다고 제안하였다.

- (1) Robustness (견고성) - 내, 외부 방해요소에 저항할 수 있는 시스템 혹은 요소들의 저항력
- (2) Redundancy (잉여성) - 방해요소가 작용하였을 경우 시스템의 기능을 지속적으로 유지하기 위한 대체자원 등의 여유분
- (3) Resourcefulness (자원력) - 비상상황을 인지하고 필요한 자원을 확보, 우선순위에 따라 적재적소에 배치할 수 있는 능력
- (4) Rapidity (신속성) - 신속하게 비상상황에 대처할 수 있는 능력

Richards et al. (2007)는 비상상황의 발생상황에 따라 두 단계로 구분하여 복원력의 속성을 규정하였다. 첫 번째 단계는 미연에 비상상황을 예측하고 대비함으로써 초기 피해를 최소화하는 단

계이고, 두 번째 단계는 비상상황이 발생한 후의 복구단계로써 시스템의 요소를 재배치하고 상황에 적응함으로써 시스템의 기능을 최대한 유지하는 단계이다.

#### 3.2 복원력의 정량화 방안

정상상황에서의 시스템의 기능(performance)을 100으로 표시하였을 때, 비정상상황에서는 기능수행능력이 100이하로 감소할 것이므로 기능의 저하정도를 수치로 정량화할 수 있다면 아래의 식과 같은 복원력 곡선식을 유추할 수 있을 것이며 이를 그림으로 나타내면 [그림 2]와 같다.

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$$

여기서 R은 시스템의 복원력을 정량화 값, Q(t)는 시간 t에서의 시스템의 기능수행능력을 나타낸 값이다. 또한, t0는 비상상황이 발생한 시간, t1은 시스템의 복원이 완료된 시간을 각각 의미한다. 따라서, 기능수행능력 100을 최대값으로 하였을 때, 복원력 곡선의 위부분이 바로 시스템이 외부 요인에 의해 기능을 상실한 정도를 나타낸다고 할 수 있고, 시간 (t1-t0)가 시스템이 일부 기능을 상실하여 기능수행능력이 저감된 시간을 의미한다.

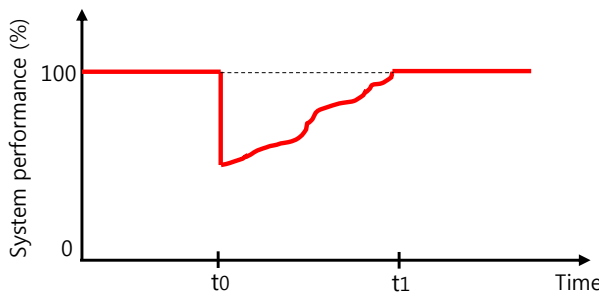


그림 2. 시스템의 복원력 곡선, 출처: Bruneau et al. (2003)

여기서, 시스템의 기능수행능력을 표현할 수 있는 정량화지수는 시스템마다 상이할 것이다. 예를 들어, 용수공급 시스템의 경우에는 수요량 대비 실제 공급량의 비율로 나타낼 수 있으며, 전력공급시스템의 경우, 전력공급 중단 후 전력이 공급되기까지의 복구시간(speed of restoration), 시스템의 수리효율(repair efficiency, %) (Shinozuka et al. 2004) 등으로 나타낼 수 있으며, 도로 및 교통시스템의 경우에는 교통체증에 따른 주행시간의 증가 (Werner et al. 2005) 혹은 기능을 회복하는데 걸리는 시간 등으로 정량화 할 수 있을 것이다.

### 3.3 복원력의 정량화 지수

3.2절의 내용을 좀 더 일반화 하여, 정량화 지수를 정의할 수 있다. 즉, 사고 발생 전, 후의 시스템의 기능수행능력을 비율로 정량화한 값을 복원력 지수(resilience metric, R)라 하고, 이 값은 0에서 1사이의 값을 갖게 된다. 지수값이 0에 가까울수록 심각한 사고가 발생하였음을 의미하고, 회복력이 낮은 것으로 판단할 수 있다. 반대로 사고가 발생한 후에도 지수값이 1을 유지한다면, 시스템이 영향을 받지 않고 제 기능을 수행하고 있다고 판단할 수 있다. 위의 개념을 수학적식으로 정리하면 다음과 같다.

$$R = \frac{\int_0^t R(t) dt}{t}$$

$$R(t) = \begin{cases} \frac{V_{after-shock}}{V_{before-shock}} & \text{for } |PM_{before-shock}| > |PM_{after-shock}| \\ \frac{V_{before-shock}}{V_{after-shock}} & \text{for } |PM_{before-shock}| < |PM_{after-shock}| \end{cases}$$

여기서,

R                    복원력 지수 (0~1)  
 t                    시간  
 Vbefore-shock    사고발생 전 시스템에 의한 서비스 공급량

Vafter-shock      사고발생 후 시스템에 의한 서비스 공급량  
 PMbefore-shock    사고발생 전 시스템의 기능수행능력 정량화 값  
 PMAfter-shock     사고발생 후 시스템의 기능수행능력 정량화 값

이러한 복원력의 정량화 지수는 시스템의 현재 복원능력을 평가하기 위한 지표로 활용이 가능하고 또한 복원력을 증진하기 위한 대안 선택 시 활용이 가능하다.

### 4. 복원력 개념의 적용 예

복원력은 시스템의 계획단계에서 여유분(redundancy)을 고려한 설계를 통해서 향상될 수도 있고, 혹은 사고발생시 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. 이러한 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 수압으로 인해 몇몇 지점에서 관이 파손되어 누수가 발생하는 경우가 대부분이다 (그림 3). 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 중단될 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 않은 펌프를 추가로 가동할 수 있으며, 이러한 적절한 대처를 통해 용수공급량을 증가시킬 수 있다. 즉, 펌프 추가 작동과 같은 적절한 운영을 통해 시스템의 기능을 일부 원상 복구할 수 있음을 알 수 있다 (즉, 복원력 증가). [그림 3]에 도시된 배수관로 시스템은 배수지로부터 연결된 3대의 펌프로부터 용수를 공급하고 있다. 6번 절점과 9번 절점 사이에 위치한 관이 파괴되어 누수가 발생하는 경우를 가정해 보자. 누수신고가 접수되었을 때 가장 먼저 해야 할 일은 파괴된 관 부근에 위치한 밸브를 닫고 더 이상 누수가 발생하지 않도록 해당지역을 격리(isolation)하는 것이다.

해당지역을 격리하는 순간, 격리지역 내의 수용가에는 용수공급이 중단되어 단수가 발생하며, 하류지역 전반에 걸쳐 수압이 감소하게 된다. 이 때, 3대의 펌프 중 작동하지 않던 펌프를 추가로 가동하였을 경우, 단수지역은 여전히 용수공급이 불가능하지만, 수압이 부족하여 용수공급이 원활하지 않던 지역에는 일부 공급량이 회복될 수 있

을 것이다. 이러한 상황을 시간에 따른 용수공급량을 나타낸 그래프로 표시하면 [그림 4]와 같다. T1시간에 관 파손이 발생함과 동시에 시스템으로 전달되는 전체 공급량은 파괴된 관을 통한 누수(Qburst)에 의해 증가하게 된다. 하지만, 일부 수요자는 공급이 차단되어 전체 수요자에게 공급된 용수량(Qsupplied)은 전반적으로 감소하게 된다. 일반적으로 관 파손이 발생하였을 경우, 관 파손 지점을 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 T3시간에 파손된 관이 교체되거나 보수되기까지 (T3 - T2) 시간 동안 시스템은 정상적인 기능을 발휘하지 못하게 된다. 이 기간 동안 추가적으로 가동이 가능한 펌프를 작동시켰을 경우, 시스템 전반에 압력을 끌어올릴 수 있게 되어, 수압이 낮아 용수를 공급받지 못하던 수요자도 원활한 용수공급이 가능하게 되어 시스템 전체 공급량은 증가하게 된다. 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 시스

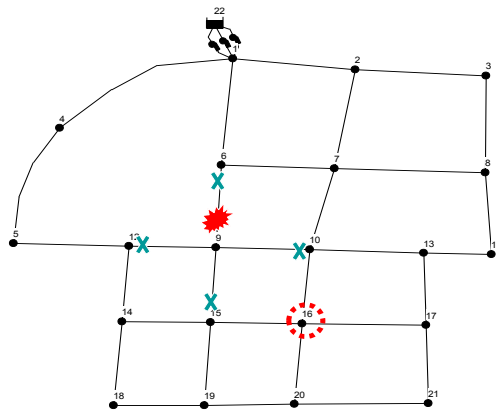


그림 3. 배수관로시스템 누수발생 모식도

템의 복원력(resilience)을 나타내는 지수로 사용될 수 있다. 위의 경우 추가적인 펌프운영으로 인해 전력비가 일부 상승할 수 있으나, 전체적인 용

수공급량의 제고에 따른 서비스개선 효과를 고려하여 경제성을 판단할 필요가 있을 것이다.

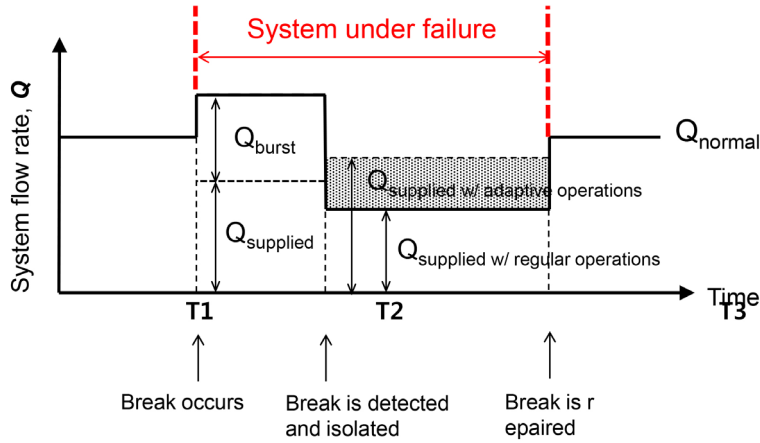


그림 4. 관 파손 후 추가펌프 운영을 통한 복원력 개선

## 5. 결론

시스템의 복원력을 평가하는 것은 시스템의 계획, 설계 및 운영에 있어서 중요한 사안이다. 본고에서는 사회기반시스템의 복원력의 개념과 다양한 정의를 살펴보고, 복원력의 정량화 방안을 제안하였다. 수자원시스템의 복원력의 적용 예로서 상수 관망 시스템의 관 파손사고를 살펴보았다. 관 파손 시 적절한 추가 펌프 운영을 통해 물 공급능력을 일부 향상시킬 수 있었으며 이를 정량화하는 방안을 제시하였다.

이 밖에도 다양한 시스템에 복원력의 개념을 도입함으로써 외부요인에 대응하는 시스템의 안정성을 평가할 수 있을 것이다. 시스템의 복원력 증진방안을 평가하기 위한 방법으로 다음과 같은 다섯 가지 절차를 생각해 볼 수 있다.

(1) 시스템 특성에 가장 적합한 복원력 지수를 선정

(2) 시스템 내 가장 중요한 혹은 가장 취약한 요소 (component)를 선정

(3) 해당 요소의 파괴상황을 모의하여 시스템의 복원력을 정량화 (복원력 지수)

(4) 다양한 시스템 복구전략 및 보강기법 등을 적용하고 (3)과정을 반복

(5) 비용-편익 분석법을 통해 여러 대안 중 가장 적절한 대안을 최종 선택

사회기반시설물은 홀로 존재하지 않고 여러 시설물들이 유기적으로 연계되어 (interdependency) 운영된다. 따라서 어느 한 시스템의 파괴는 다른 시스템에 연쇄적으로 영향을 미치게 된다. 극명한 예로 미국에서 발생했던 911 테러를 사례로 들 수 있다. 세계무역센터에 용수

를 공급하던 주 관로가 무역센터의 붕괴와 동시에 파손되어 용수공급이 이루어질 수 없는 상황이 되었고, 주 관로의 파손에 의해 사고 주변 지역의 수압이 일제히 감소하여 소방용수의 공급이 원활하지 못하게 됨으로써 화재진압에 어려움이 발생하였다. 또한 파손된 관을 통해 발생한 누수가 지하 통신시설의 침수를 야기하여 한동안 유, 무선 통신이 모두 마비되어 신속한 사후조치가 이루어지지 못해 피해가 더욱 크게 발생하였다. 이처럼 전력, 통신, 도로/교통, 용수공급 시스템은 모두 유

기적으로 연계되어 있기 때문에 보다 정확한 복원력 평가를 위해서는 이들을 통합한 연계시스템에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다. 🌊

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다 (과제번호 NRF-2013RIA1A1060726). 이에 감사드립니다.



Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., and vonWinterfeldt, D. (2003). "A frame to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.

Bruneau, M., and Reinhorn, A. (2007). "Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities." *Earthquake Spectra*, 23(1), 41-62.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resour. Res.*, 18(1), 14-20.

Richards, M. G., Hastings, D. E., Ross, A. M., and Rhodes, D. H. (2007). "Design principles for survival system architecture." 1st IEEE Systems Conference, Honolulu, Hawaii, 1-9.

Sheffi, Y. (2005). "The resilient enterprise: Overcoming vulnerability for competitive advantage." MIT Press, USA.

Shinozuka, M., and Chang, S. E. (2004). "Modeling spatial economic impacts of disaster." Springer Verlag, Berlin.

Werner, S. D. (2005). "New developments in seismic risk analysis of highway systems." *Research Progress and Accomplishments 2003-2004*, 221-238.