

## 사회기반시설의 재해 회복 탄력성 강화 방안



**이슬비**  
인천대학교 도시건축학부 조교수, sblee@inu.ac.kr

### 1. 머리말

사회기반시설은 사회의 기능을 유지하게 하는 가장 기본적인 시설로 전력, 가스, 도로, 통신, 상·하수처리 시설 등을 포함한다. 사회기반시설은 다양한 지역에 거주하는 소비자에게 골고루 공공서비스를 제공하는 것을 목적으로 하고 있어 광범위한 지역에 분산되어 있다. 또한, 일부 땅속에 매립된 시설물을 제외하고는 외부환경에 그대로 노출된다는 것이 특징이다. 따라서 자연재난이 발생하였을 때 그 피해를 고스란히 받게 될 수밖에 없다. 일례로 올해 2월 미국 텍사스에서는 30년 만의 겨울 폭설과 한파로 인해 약 450만 가구에 수일 동안 전기 공급이 중단되는 일이 있었다. 겨울에도 영상 10도 이상을 유지하던 텍사스가 최저기온 영하 22도 수준으로 기온이 떨어지자 전력을 생산하는 발전소 터빈이 얼어붙은 것이다. 이례적인 추위로 인한 정전으로 텍사스 오스틴에 있는 삼성전자 반도체 공장 역시 약 6주간 가동 중단되었는데, 이로 인한 피해액은 3천억 원 이상일 것으로 추정되고 있다.

이처럼 재난으로 인한 사회기반시설의 피해는 도시 차원으로 확장된다. 특히 전력시설과 같이 최상단에 있는 기반시설이 피해로 인해 가동 중지되는 경우 전력을 공급받는 하위 시설물 모두 피해를 받게 되므로 정전이 발생할 수도, 단수가 발생할 수도, 중요 물품 생산이 중단될 수도 있다. 즉, 도시 차원에서 사회기반시설의 재해를 예측하고 대응하기 위해서는 물리적으로는 손상이 발생하지 않았지만, 연쇄 효과로 인하여 실제로는 기능하지 못하는 피해파급까지 고려해야 한다.

본 고에서는 사회기반시설의 재해 예측을 복잡하게 하는 상

호의존성의 개념에 대하여 알아보고, 사회기반시설의 재해 회복 탄력성을 높이기 위해 적용되고 있는 기술들에 대해 논하고자 한다.

### 2. 사회기반시설 간의 상호의존성

사회기반시설은 보통 개별시설물이 아니라 여러 개의 시설물이 하나의 역할을 하는 경우가 많다. 예를 들어, 전력시설의 경우 발전소에서 전기를 생산하고 변전소에서 전기를 변환하여 송전선로를 거쳐 최종적으로 소비자에게 전달되었을 때 그 기반시설의 역할을 다 하였다고 할 수 있는 것이다. 따라서 하나의 사회기반시설을 구성하는 요소들은 서로 밀접한 영향을 주고받는 상호의존성(Interdependency)을 갖는다.

상호의존성의 값은 행렬로도 표현할 수 있다. 가장 간단한 경우 한 시설물의 기능이 다른 시설물의 기능에 직접 영향을 준다면 1로 그렇지 않다면 0으로 표시된다. 즉, 상호의존 행렬에 1의 값이 많다는 건 구성요소가 서로 얽힌 복잡한 사회기반시설인 것이다.

그렇다면 사회기반시설 간 상호의존성이 높을수록 연쇄 피해가 발생할 가능성이 큰 것일까? 시설이 서로 연결되어 있지 않고 독립적으로 기능한다면 다른 시설로부터 피해파급이 일어나지 않을 것이므로 언뜻 맞는 말인 것 같지만, 꼭 그렇지만은 않다. 예를 들어, <그림 1>의 나무(Tree)형 네트워크에서 2번 구성요소가 손상되었다고 해보자. 이 경우, 연결되어있는 4번 구성요소도 기능하지 못하게 된다. 그런데 이를 방지하기 위해서 5번 구성요소에서 4번 구성요소로 연결되는 링크를 신설해준다면, 4번 구성요소는 2번 구성요소가

고장 나더라도 1번, 3번, 5번 구성요소를 거쳐 기능할 수 있다. 즉, 네트워크의 상호의존성이 높아졌지만, 연쇄 피해의 발생 가능성은 작아진 것이다. 따라서 사회기반시설의 상호의존성이 현실적으로 0에 가까운 아주 작은 값이 될 수 없다면, 오히려 적절한 수준의 큰 값을 유지하는 것이 어느 한쪽에 문제가 생겼을 때 우회경로를 선택할 수 있도록 한다. 다만 모든 구성요소를 연결하는 것은 경제적인 문제에 부딪히게 되기 때문에 이상적인 값을 찾아야 할 것이다.

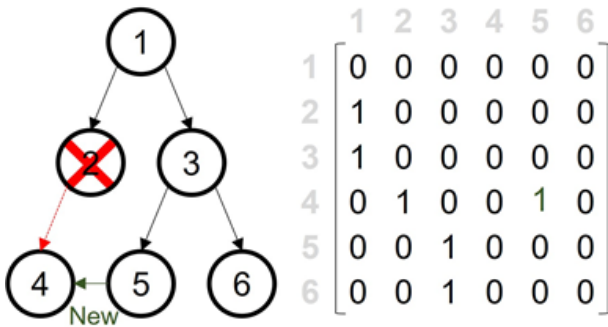


그림 1. 나무형 네트워크의 상호의존행렬

상호의존성 분석은 보통 발전소, 변전소와 같이 하나의 기반 시설 내에서 수평적으로도 수행되기도 하고, 서로 다른 사회기반시설(예: 전력과 상수도, 전력과 통신 등) 간 수직적으로 수행되기도 한다. 2015년 국내의 한 연구에서는 경험적인 데이터를 기반으로 사회기반시설 간 수직적인 상호의존성 분석을 시도하였고, 그 크기를 시간으로 표현하였다. 예를 들어, 광역정전이 발생한다고 한다면 항만, 화물, 철도와 같은 교통기반시설에는 즉시 피해가 과급되고 정수장에는 약 1시간, 항공에는 약 7시간, 통신과 가스시설에는 약 10시간 또는 24시간이 지난 후에 피해가 과급된다고 예측하였다. 따라서 만약 통신 시설을 관리하는 의사결정자의 경우, 지역에 발생한 정전이 10시간 이내에 복구되기 어려울 것 같다고 판단된다면 다른 방법으로라도 전력을 공급할 방안을 신속하게 검토해야 할 것이다.

### 3. 사회기반시설의 회복 탄력성과 관련 기술현황

회복 탄력성(Resilience)은 제자리로 돌아오는 능력을 일컫는 말로, 사회기반시설의 재해와 관련하여 폭넓게 사용되는 개념이다. 현실적으로 자연재난의 경우 발생의 빈도나 강도를 인간의 힘으로 조절할 수 없으므로, 재난의 발생을 전제로 가능한 피해를 최소화하거나, 피해 이전의 상태로 신속하

게 복구하는 능력을 나타내는 지표가 회복 탄력성인 것이다. 구체적으로 회복 탄력성은 다음의 네 가지 구성요소로 설명할 수 있다.

#### 3.1 견고성(Robustness)

견고성이란 성능 저하 없이 외부 충격을 흡수하고 견딜 수 있는 기반시설 고유의 강도를 의미한다. 더 튼튼한 재료로, 더 강력한 안전기준을 준수하여 시공된 사회기반시설일수록 견고성이 높을 것이다. 반면 기반시설을 구성하고 있는 부재들이 노후화되는 경우 같은 재난에서 더 큰 피해가 발생할 수 있다. 다시 말해 시설물의 견고성은 일반적으로 시간이 지날수록 낮아지게 되며, 이 때문에 시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법에서는 완공 후 30년이 지난 시설물에 대해 추가적인 안전점검이 필요함을 명시하고 있다. 그런데 문제는 안전점검이 필요한, 즉 견고성에 문제가 생길 수 있는 기반시설물이 점점 늘어나고 있다는 것이다.

따라서 많은 시설물을 빠르게 점검하는 것이 사회기반시설의 견고성 평가 기술이 추구하는 방향이며, 이로 인해 인공지능 기반 영상 분석 기술이 주목을 받고 있다. 인공지능 기반 영상 분석 기술은 카메라가 장착된 무인 항공기, 인공위성, CCTV 등에서 획득한 영상 정보를 분석하여 기반시설의 상태를 점검하는 기술로, 개별적인 센서의 설치가 필요하지 않아 경제적이다. 또한, 당연히 사람이 눈으로 보는 것보다 더욱 많은 지역을 빠르고 객관적으로 볼 수 있다는 장점이 있다.

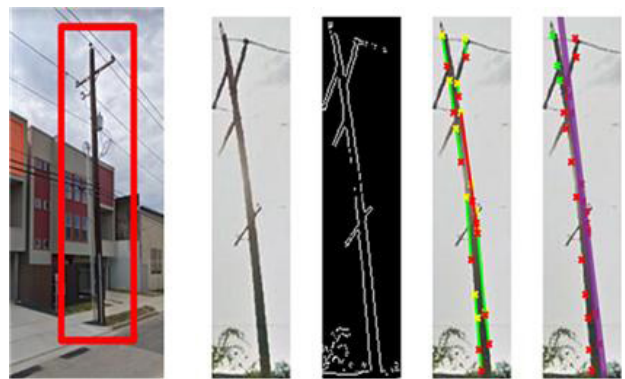


그림 2. 영상기반 전신주 기울기 예측(Kim et al. 2021)

<그림 2>는 Google Street View에서 취득한 사진을 분석하여 전신주의 기울어진 정도를 측정하는 연구의 예시로, 기울기에 따라 전신주가 바람에 얼마나 견고하게 버티는지를 예측한 것이다. 해당 연구에 따르면, 제안한 방법을 통해 약 1.6

도, 4.2도, 6도 기울어진 전신주의 기울기를 유사하게 추정할 수 있으며 바람 방향으로 약 30도 기울어진 목재전신주는 수직의 목재전신주와 비교하여 허리케인 2등급의 바람(풍속 42m/s~45m/s)에서의 견고성이 약 18% 감소 된다고 한다.

### 3.2 가외성(Redundancy)

가외성이란 외부 충격으로 손상된 기반시설을 대체할 수 있는 기능 대체재의 규모로 정의된다. 가외성은 앞서 설명한 상호의존성과 밀접한 관계가 있는 개념으로, 재해 발생 가능성이 큰 기반시설에 대한 백업(backup) 시스템(예: <그림 1>의 네트워크 5번 구성요소에서 4번 구성요소로 연결되는 경로)을 확보함으로써 높일 수 있다.

가외성은 종종 효율성과 상충관계에 있는 것으로 해석되기도 한다. 비상시에 사용 가능한 대체재가 많다는 것은 정상 시 유휴상태에 있는 시설물이 많다는 것이기 때문이다. 따라서 가외성과 효율성 사이의 이상적인 접점을 찾는 것이 관련 연구 분야의 주요 목표이며, 홍수로 인한 도로 침수 시 차량 흐름 예측을 위한 딥러닝 기술 등이 논의되고 있다.

### 3.3 자원부존성(Resourcefulness)

자원부존성이란 외부 충격에 손상된 기반시설을 복구하기 위해 동원될 수 있는 자원 및 서비스의 양을 나타낸다. 사회기반시설 재해 대응 연구의 가장 큰 특징은 안전한 사회를 만들기 위한 공익을 목적으로 한다는 것이다. 즉, 국가나 공공기관이 재해 대응의 주도적인 역할을 해야 한다는 인식이 강하고, 이는 민간의 투자를 방해하는 요소로서 작용하게 된다. 그뿐만 아니라 사회기반시설의 재해를 줄이는 것은 직접적인 이익을 창출하는 것이 아닌 부정적인 요소를 최소화함으로써 간접적인 편익을 얻는 활동이기 때문에 실제로 재난



그림 3. 화재 진압을 위한 소방 로봇(Gutknech, H. 2020)

이 빈번하게 발생하지 않는다면 공공적인 투자 역시도 망설이게 하는 부분이 있다.

이러한 이유로 사회기반시설의 자원부존성을 높이는 것은 어려운 일이며, 특히 제한된 인적 자원 문제를 해결하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 자동화, 무인화 등이 자원부존성 확보를 위한 주요 키워드가 되며, 미국 로스앤젤레스에서는 <그림 3>과 같은 소방로봇이 기반시설의 화재 현장에 투입되어 불길을 진압하고 잔해를 제거하는 등 인적 자원의 역할을 대체하고 있다.

### 3.4 신속성(Rapidity)

신속성이란 외부의 충격으로 손상된 기반시설을 빠르고 안정적으로 복구할 수 있는 능력을 말한다. 일반적으로 사회기반시설 재해 대응에서의 신속성은 시간으로 측정되기 때문에 설정된 목표를 달성하기 위해 우선순위를 정하는 것이 주요 연구 분야가 된다. 따라서 손상된 사회기반시설을 정상 수준으로 돌려놓기 위해 가장 먼저 요구되는 사안을 파악하고, 복구의 전개와 진행 수준을 파악할 필요가 있다. 즉, 정보의 접근성이 신속성을 결정짓는 요인이 되므로, 최근에는 재난 발생 직후 트위터(Twitter)와 같은 소셜 네트워크 서비스(Social Network Service)에서 실시간으로 생성되는 텍스트 정보를 활용하여 기반시설의 피해를 파악하고 복구 진행을 점검하는 연구가 수행되고 있다.

## 4. 맺음말

사회기반시설의 회복 탄력성을 높이기 위해 견고성, 가외성, 자원부존성, 신속성 관련 연구 분야에 다양한 첨단 기술들이 적용되고 있다. 그럼에도 불구하고 사회기반시설의 재해는 피할 수 없는 문제이며, 심지어 많은 학자들이 기후변화로 인해 매년 재난의 강도와 빈도가 증가할 것으로 예상하고 있다. 즉, 현대사회는 재난과 공존하며 살아갈 수밖에 없다고 할 수 있는데, 이러한 상황에서 기반시설의 회복 탄력성을 강화하는 것이 관리 주체만의 몫인가라는 의문이 든다. 재난 이후 더 큰 피해 확산을 막기 위해 소비자들도 잠시의 불편함을 감수하는 등 회복 탄력성 강화에 일조할 방안을 찾아보자는 것이다. 물론 사회기반시설이 날로 노후화되고 있는 상황에서, 유지보수비용을 아끼고자 재해 위험을 소비자에게 전가하는 것이 아니냐는 의심을 받지 않기 위해서는 보다 세심한 고려가 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.
2. Folke, C. (2006). "Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses." *Global environmental change*, 16(3), 253-267.
3. 신진동(2015). "국가기반시설 상호 연계성과 초대형 재난의 위험성." 국토, 제406호, 32-39.
4. Gutknech, H. (2020) "L.A. fire department's new firefighting robot tested in major downtown blaze." *Los Angeles daily news*.
5. Kim, J., Kamari, M., Lee, S., & Ham, Y. (2021). "Large-scale visual data-driven probabilistic risk assessment of utility poles regarding the vulnerability of power distribution infrastructure systems." *Journal of construction engineering and management*, 147(10), 04021121.