

라이프라인 시스템 상호의존성을 고려한 기능 저하 평가 및 복구계획 분석

이슬비¹ · 박문서* · 이현수¹ · 황성주¹

¹서울대학교 건축학과

Analysis of the Degraded Performance and Restoration Plan of Lifeline Systems Considering Interdependency in the Post-disaster

Lee, Seulbi¹ · Park, Moonseo* · Lee, Hyun-Soo¹ · Hwang, Sungjoo¹

¹Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract : Lifeline service disruptions can have significant impacts on local community in the aftermath natural disaster. Although effective restoration strategies with accurate damage assessment are required, the internal complexity of lifeline networks and their interdependency makes the understanding restoration process of lifeline systems a difficult issue. Additionally, the limitations of previous research relating the influence assessment of lifeline to community disaster resilience, highlight the need for understanding of lifeline networks. Therefore, this paper presents an agent-based model to discover emergent behavior and evaluate the interdependency and resiliency in lifeline networks. This research will provide basic guideline of resource allocation in order to mitigate cascading failures of the post disaster restoration processes.

Keywords : Disaster Restoration, Lifeline, Interdependency, Resiliency, Agent-Based Model

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물의 밀도가 높은 도시에서의 재난은 동시다발적인 피해를 발생시켜 지역사회 기능을 마비시키는 결과를 초래할 수 있다(Lambert and Patterson 2002; Comfort et al. 2004). 또한 재난으로 인한 피해는 복구 전까지 지속적이고 연쇄적으로 발생한다는 특징을 갖기 때문에 재난 발생 이후 즉각적인 복구계획의 수립은 사회의 피해를 완화하기 위하여 매우 중요하다(Chang and Miles 2004).

특히 전력, 가스, 상하수도 시설과 같이 지역주민의 기본 생활을 유지하는 데에 필요한 라이프라인 시스템(Lifeline System)이 재난으로 인해 가동중지될 경우 라이프라인 시스템에서 제공하는 서비스를 필요로 하는 다른 시설물들의

2차 피해를 야기할 수 있다(Chou and Tseng 2010). 실제로 2010년 칠레에서 발생한 규모 8.8의 지진 당시 진원지 근접지역의 전기 공급이 중단되면서 통신이 모두 두절되어 피해상황 집계 및 이에 따른 재난대응체계 구축을 어렵게 했다. 또한 2012년 허리케인 '샌디' 이후 미국 동북부 지역의 손상된 전력망의 복구 지연으로 난방이 끊겨 주민들이 불편을 겪었고, 교통 운행 중지로 인해 물류 공급이 지연됨에 따라 해당지역의 생필품 공급도 차질을 빚었다.

따라서 재난 이후 손상된 라이프라인 시스템의 복구는 전체 지역 단위의 복구과정에 있어 우선시 되어야 한다. 그러나 라이프라인 시스템의 경우 광범위한 지역에 분산된 네트워크이기 때문에 라이프라인 시스템을 구성하고 있는 개별 요소의 물리적인 손상도 평가로는 전체 시스템의 기능 저하를 판단하는 데 어려움이 있다(Rose et al. 1997, O'Rourke 2007). 예를 들어 재해로 인한 전력 네트워크 내 임의 발전소의 전력공급중단이 다른 발전소 및 변전소의 가동 중지로 이어지고 전체 전력 시스템을 마비시키는 상황은 개별 요소 손상도의 합계로 예측하기에 한계가 있다. 또한 한정된 자원 내에서 피해지역의 기능을 빨리 회복시키기 위해 라이프라인 시스템 내 어떤 요소에 먼저 자원을

* Corresponding author: Park, Moonseo, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea
E-mail: mspark@snu.ac.kr
Received May 8, 2014; revised June 3, 2014
accepted June 11, 2014

배분해야 복구기간을 줄이고 자원의 이용효율을 높일 수 있는지에 대한 추가적인 고려가 필요하다(Duenas-Osorio et al, 2007, Tsuruta et al. 2008).

본 연구는 라이프라인 시스템의 네트워크적 특성으로 인한 연쇄피해를 산정하기 위해 피해지역의 공간적 특성 및 라이프라인 시스템 간의 상호의존성을 고려한 라이프라인 서비스의 기능 저하 평가방법을 제시한다. 또한 라이프라인 기능 회복 시물레이션 모델 개발을 통해 전체 시스템으로의 피해 파급을 줄일 수 있는 복구 자원 배분계획 수립을 지원하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위, 방법 및 기대효과

본 연구에서는 라이프라인 시스템을 지진으로 인해 손상된 전력 네트워크로 한정하고, 전력 네트워크 중 시설물에 해당하는 발전소와 변전소에서만 파괴가 발생하는 것으로 가정한다. 또한 주요 시설과 공공서비스들의 복원이 이루어지는 시기인 지진 발생 이후 약 5주 이내의 복원기간(Restoration Period, Petak 1985)을 연구 범위로 설정한다.

본 연구의 진행 절차는 다음과 같다.

(1) 라이프라인 시스템의 복구와 관련한 기존 선행연구 및 이론 고찰을 통해 라이프라인 시스템 복구 시 고려해야 할 영향요인을 도출한다.

(2) 도출된 영향요인을 고려하여 지진 피해지역 라이프라인 서비스의 기능저하 평가방법을 제시한다.

(3) 라이프라인 시스템의 물리적 손상 및 기능저하 평가를 기반으로 라이프라인 기능 회복 모델을 구축한다.

(4) 실제 재난 사례를 대입하여 구축된 모델을 검증하고, 자원배분계획에 따른 복구과정 분석을 통해 지역사회의 기능을 빠르게 회복할 수 있는 복구계획을 도출한다.

본 연구의 라이프라인 기능 저하 평가 및 회복모델을 통해 전력 네트워크의 구성에 따른 서비스 공급 감소를 예측할 수 있으며, 이를 기반으로 전체 전력 시스템에 파급효과가 큰 개별 요소를 판단하고 먼저 복구자원을 배분하도록 하여 피해지역의 회복력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

2. 예비적 고찰

2.1 재난 후 라이프라인 시스템 복구

라이프라인 시스템은 지역사회가 필요로 하는 공공서비스를 제공하는 '생명줄'역할을 하는 시설로 전력, 가스, 통신, 교통, 상수도, 하수도시설을 포함하며, 이들은 거점시설이 되는 노드(Node)와 두 노드를 연결하는 링크(Link)의 집합인 네트워크로 구성된다(Peerenboom and Fisher 2007). 예를 들면 전력시설의 경우 발전소, 변전소 등의 시설물이 노드가 되며 이를 연결하는 송배전선로가 링크가 된다.

1971년 캘리포니아에서 발생한 산 페르난도 지진은 종전의 지진과는 달리 전력, 가스, 수도시설에 큰 피해를 입혀 재난 이후 라이프라인 시스템의 복구와 관련한 연구의 필요성을 환기하였다(Kameda 2000). 이에 따라 다양한 분야에서 라이프라인 시스템이 지역사회에 미치는 영향 분석과 함께 라이프라인 시스템의 피해를 예측할 수 있는 방안에 대한 연구가 진행되었다.

Tsuruta et al. (2008)는 실제로 발생하였던 재난사례를 기반으로 통계적 모델을 구축하여 하나의 라이프라인 기능 손실이 다른 라이프라인에 미치는 파급효과를 분석하였다. 또한 이러한 통계적 모델을 보다 일반화시킨 레온티에프의 투입-산출모형(Leontief's Input-Output Model)을 활용하여 지진 발생 이후 라이프라인 네트워크의 상호연관행렬을 작성하고 재해완화계획을 수립하는 연구도 수행되었다(Duenas-Osorio et al. 2007, Haimes 2005). 이와 같은 연구들은 실제 데이터를 활용하여 구체적이고 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다는 장점이 있으나, 과거 재난 이력에 대한 통계자료가 미비한 경우 적용이 어렵고 기초자료수집에 시간과 비용이 소요된다.

최근에는 라이프라인 시스템의 분석에 있어 모델링이나 컴퓨터 시물레이션을 활용하는 연구가 주목 받고 있는데, 이러한 분석기법은 현실에서 발생확률이 낮아 실증적인 연구가 어려운 재난상황을 모사하여 라이프라인의 위험관리, 피해추정, 자원 할당 등을 가능하게 한다(Rinaldi 2004). Sanford et al. (2008)는 개별 구성요소들이 네트워크효과를 유발할 때 유용한 에이전트기반모델(Agent-based Model)을 활용하여 라이프라인 시스템의 유지보수 의사결정 지원 시스템을 개발하였다. 이 연구는 라이프라인 시스템 중 도로에 초점을 맞추어 도로 네트워크의 구성, 물리적 상태, 비용 등을 고려한 보수 우선순위를 도출하였다. 그러나 해당 연구는 에이전트의 행동률을 경제적인 측면에서 접근하였기 때문에 경제성 보다는 신속한 기능의 회복을 요하는 재난 이후의 상황에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 재해의 확산을 산정하는데 적합한 레온티에프의 투입-산출모형을 이론적 바탕으로 에이전트기반모델을 구축한다. 이는 기존 통계적 모델의 한계를 보완하고 라이프라인 시스템 간의 상호작용으로 인한 연쇄 피해효과를 분석하여 재난 복구 과정에서 발생 가능한 결과의 시물레이션을 가능하게 한다. 또한 전력 네트워크의 내부 구성요소를 개별 에이전트로 설정하여 전기 전달 경로 내 특정 발전소 및 변전소의 상태 변화가 전체 전력 시스템에 미치는 파급효과를 예측할 수 있도록 한다.

2.2 에이전트기반모델(Agent-based Model)

에이전트기반모델은 에이전트라는 자율적인 의사결

정 객체의 개별 행동에 의해 발현되는 현상을 전체론적인 시각으로 분석하는 컴퓨터 시뮬레이션 모델링 기법이다 (Bonabeau 2002, Janssen and Ostrom 2006).

에이전트는 각각 다른 에이전트와 구별되는 속성을 지니고 있으며, 주어진 행동규칙에 따라 다른 에이전트 및 외부 환경과 상호작용한다. 임의의 에이전트는 다른 에이전트와 외부환경의 정보를 인지하여 의사결정하며 그 결과는 다시 다른 에이전트들에게 전달된다.

이러한 에이전트기반모델은 개별 구성요소의 단순한 합으로만은 설명할 수 없는 전체 네트워크 시스템의 복잡한 창발현상(Emergent behavior)의 분석도구로서 사용될 수 있다(Bonabeau 2002, Sanford and McNeil 2008). 특히 에이전트기반모델을 통한 시뮬레이션은 실제 재현이 어려운 재난 환경에서 수립 가능한 전략들을 검토하여 최적의 의사결정을 내리는 것을 가능하게 한다.

본 연구에서는 라이프라인 시스템의 기능적인 회복에 초점을 맞춘 에이전트기반모델을 구축하여 지진이후 손상된 라이프라인의 개별 구성요소가 전체 네트워크시스템에 발현하는 연쇄 파급효과를 분석하고 복구자원배분계획에 따른 복구과정을 시뮬레이션한다.

2.3 라이프라인 네트워크 분석의 고려사항

선행연구고찰의 결과 라이프라인 네트워크 분석 시 공통적으로 1) 라이프라인 시스템의 공간적인 특성을 반영하여 2) 라이프라인 시스템 구성요소 간 상호의존성을 산정하고 3) 내부구성요소의 손상으로 인한 전체 네트워크 시스템의 연쇄피해를 산정하는 것을 확인하였다. 이에 각 단계별 항목을 라이프라인 네트워크 분석의 고려사항으로 선정하고 본 연구의 라이프라인 기능회복 모델에 반영하기로 한다.

2.3.1 공간적 특성(Spatial Characteristic)

공간적 특성은 네트워크의 물리적인 구조를 파악하기 위한 것으로 네트워크를 구성하고 있는 노드와 링크의 정보를 포함한다. 특히 지진 이후 라이프라인 시스템 내부구성요소의 물리적 손상도 평가의 경우, 진원지와 라이프라인 구성요소 간의 거리 및 연결경로가 중요 평가기준이 된다(Federal Emergency Management Agency, FEMA 2003).

따라서 본 연구에서는 라이프라인 시스템의 공간적 특성을 라이프라인 네트워크를 구성하고 있는 개별 노드의 위도, 경도 값과 각 노드 간의 연결 링크를 표현한 인접행렬(adjacency matrix)로 정의하며 이를 통해 시작 노드부터 끝 노드까지의 최단거리를 산정한다. 개의 노드로 이루어진 네트워크의 링크를 표현하는 인접행렬의 식은 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & A_{ij} & \dots \\ A_{n1} & \dots & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{if } i \text{ and } j \text{ are connected}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

2.3.2 상호의존성(Interdependency)

상호의존성이란 라이프라인 네트워크의 기능적인 특성을 평가하는 기준으로, 라이프라인 네트워크상의 하나의 구성요소의 상태가 다른 구성요소의 상태에 영향을 주거나 받는 양방향의 관계를 의미한다(Rinaldi 2004). 예를 들어 발전소에서 생산된 전기가 변전소를 통해 수요자에게 공급되는 전력 네트워크의 경우 발전소의 전기 생산 중단이 변전소의 전기 공급지연으로 이어질 수 있다. 동시에 변전소의 전력 공급량 변화로 인한 전력 우회는 인근 발전소의 전력 생산량에 영향을 주기 때문에 전력 네트워크 내 개별 구성요소들은 서로 상호의존한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 임의의 라이프라인 네트워크 구성요소의 물리적 손상이 다른 구성요소의 기능 저하로 이어지는 경우 두 구성요소가 서로 상호의존한다고 정의한다.

2.3.3 연쇄 피해효과 (Cascading Failure Effect)

앞서 살펴본 바와 같이 라이프라인 네트워크를 구성하는 개별 노드는 서로 상호의존의 관계를 갖고 있기 때문에 라이프라인 시스템의 구성요소 중 하나만 손상되어도 그 초기피해가 연쇄 피해로 증폭될 수 있는 가능성이 매우 높다. 아래 Fig. 1과 같이 노드 부터 노드 까지 단방향으로 연결되는 네트워크는 서비스를 공급해주는 경로 내 특정 노드가 손상되면 하위 노드 모두 서비스 공급이 중단 된다. 특히 시작 노드와 끝 노드가 명확히 구분될수록 네트워크 상 단부에 위치한 노드가 전체 라이프라인 네트워크에 미치는 연쇄 피해효과가 크다(Kameda 2000). 예를 들어 Fig. 1의 노드 의 손상은 해당 노드의 서비스 기능 저하만을 가져오지만 노드 가 손상될 경우 노드 와 그 하위 노드를 포함한 개의 노드에서 서비스를 공급받는 고객들에게 모두 피해를 가져오게 된다.

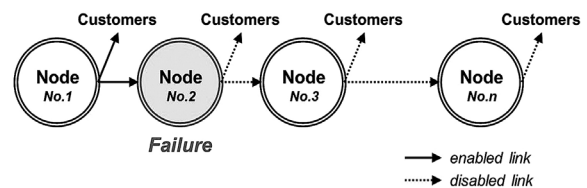


Fig. 1. Cascading Lifeline Failures (American Lifelines Alliance, ALA 2006)

따라서 라이프라인 시스템의 복구계획 수립 시에는 재난으로 인한 라이프라인 내부 구성요소의 직접적인 피해뿐만 아니라 위와 같은 연쇄 피해효과에 따른 간접적인 피해에 대한 고려가 필요하다. 또한 연쇄 피해를 줄일 수 있도록 전체 네트워크 시스템에 가장 큰 파급효과를 미치는 노드를 찾고 해당 노드에 먼저 자원을 배분할 수 있는 복구계획을 수립할 필요가 있다.

3. 에이전트 기반 라이프라인 기능회복 모델

본 장에서는 지진 이후 전력 네트워크 시스템의 신속한 손상도 평가와 효율적인 복구 자원 배분계획 수립을 위해 에이전트 기반 라이프라인 기능회복 모델을 구축하는 단계별 방법을 제시한다.

3.1 에이전트의 정의

본 연구의 라이프라인 기능회복 모델은 전력 네트워크 시스템에 초점을 맞추어 개발된다. 전력 네트워크 시스템은 Fig. 2와 같이 전력을 생산하는 발전소, 발전소에서 보내온 전력을 최초로 공급받아 변압하고 다른 변전소에 공급하는 1차 변전소, 1차 변전소에서 전달된 전력을 빌딩, 공장 교통시설 등 주요 공공시설에 보내는 2차변전소와 일반 주택에 보내는 배전변전소로 구성된다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 굵게 표시한 것처럼 에이전트를 발전소, 변전소(1차변전소, 배전변전소), 수요자 세 가지로 정의하며 최종 수요자는 일반 가구로 한정한다.

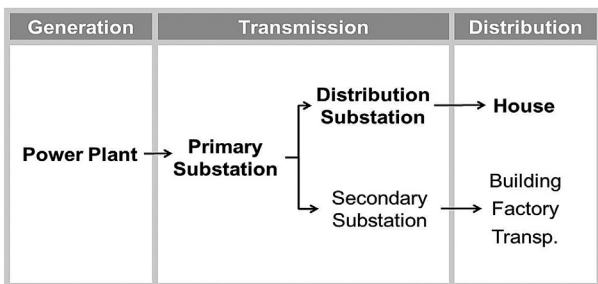


Fig. 2. Agent of Electric Power System

3.2 에이전트의 행동규칙

3.2.1 발전소 (Power Plant)

발전소는 전력을 생산하여 1차 변전소로 송전하는 기능을 하며 모든 전력 네트워크 경로의 시작점이 된다. 일반적으로 발전소는 지진 발생 시 안전하게 자동 정지하도록 설계되었고 물리적인 손상이 없더라도 정부 규제에 따른 안전점검을 마친 후 재가동하게 된다. 이에 본 연구에서는 발전소의 상태를 '정상 운행(Normal in Fig. 3. (a))'과 '운행 중지(Shutdown in Fig. 3. (a))'의 두 가지로 분류한다. 특정 최대지반가속도 이상의 지진이 발생하는 경우 모든 발

전소는 '정상 운행'에서 '운행 중지'로 상태 변화하며 다시 '정상 운행'으로 돌아가는데 걸리는 시간은 발전소의 초기 손상도를 기반으로 계산된다.

3.2.2 변전소 (Substation)

변전소는 발전소에서 직접 전력을 송전 받는 1차변전소와 공급받은 전력을 가구로 배전하는 배전변전소로 구분되어 전력 네트워크의 중간 매개체 역할을 한다. 변전소의 상태는 상위 노드에서 공급받은 전력을 하위 노드까지 얼마나 효율적으로 전달할 수 있는가로 판단된다. 본 모델에서는 FEMA에서 지진 후 시설물 손상도 평가를 위하여 개발한 HAZUS-MH의 기술 보고서에서 제시한 변전소 물리적 손상도 기준에 따라 변전소의 상태를 5단계로 나눈다. 재난에 의한 피해가 전혀 없는 경우 '손상 없음(1단계, None in Fig. 3. (b))', 변압기, 배전반 등이 망가져 변전소가 5% 내의 기능 손실을 입는 경우 '약간손상(2단계, Slight in Fig. 3. (b))', 40% 이내 '보통손상(3단계, Moderate in Fig. 3. (b))', 70% 이내 '심각손상(4단계, Extensive in Fig. 3. (b))' 그리고 모든 구성요소가 파괴되어 변전소의 기능을 전혀 하지 못하는 경우 '완전손상(5단계, Complete in Fig. 3. (b))'에 해당한다. 손상된 변전소는 우선순위에 따라 복구 자원을 공급받으며 기능을 회복한다. 예를 들어 임의의 변전소의 변압기가 지진으로 인해 파괴되어 전력을 전달할 수 있는 능력이 종전에 비해 25% 감소하였다면 해당 변전소는 '보통손상'단계이며 복구를 통해 '약간손상'단계를 거쳐 '손상 없음'단계로 돌아온다.

3.2.3 가구 (Households)

가구는 전력 네트워크의 최종 도착점으로 배전변전소가 전력을 공급할 수 있는 범위 내에 있는 일반 주거의 한 단위를 의미한다. 가구는 전력 네트워크 내 배전변전소에서 전력을 공급을 받는 상태(Consumer of Sub, in Fig. 3. (c))

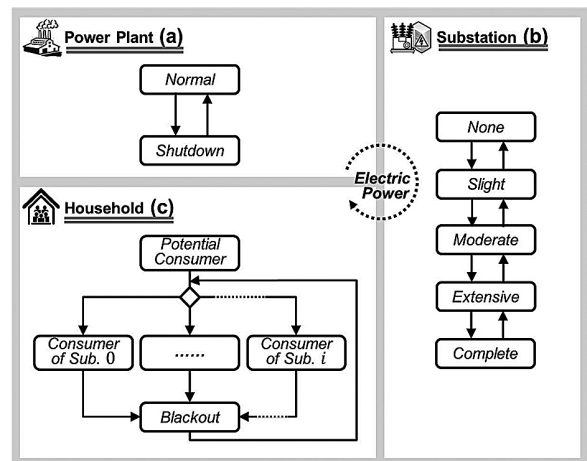


Fig. 3. Rules of Agent's Behavior

와 발전소 또는 변전소의 가동 중지로 인해 전력 공급을 받지 못하는 상태(Blackout in Fig. 3. (c))로 구분된다. 지진 이전 가구는 자신과 가장 가까운 곳에 위치한 변전소에서 전력을 공급받지만 지진 이후 변전소의 손상으로 인해 전력 공급이 지연되면 잠재적 고객(Potential Consumer in Fig. 3 (c))상태로 이전하여 현재 상태에서 가장 전력 공급 확률이 높은 변전소를 재평가하고 전력공급을 요청한다.

3.3 라이프라인 에이전트 손상도 평가

3.3.1 PGA기반의 초기 손상도 평가

일반적으로 지진에 의한 시설물 손상도 평가의 경우 시설물이 위치한 지점에서 계측된 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, 이하 PGA)를 이용하여 직접적인 피해를 평가하게 된다. 본 연구에서는 지진의 규모와 진원지까지의 거리, 진원 깊이와 같은 세 가지 변수를 통해 비교적 간단하게 PGA를 추정할 수 있는 Kanno et al. (2006)의 회귀모형을 사용하고자 하며 그 식은 다음과 같다.

$$\log pre = \begin{cases} a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 10^{e_1 M_w}) + c_1 + \varepsilon_1 & (D \leq 30km) \\ a_2 M_w + b_2 X - \log(X) + c_2 + \varepsilon_2 & (D > 30km) \end{cases} \quad (3)$$

where, $pre =$ predicted PGA (cm/sec^2)
 $M_w =$ moment magnitude
 $X =$ distance to the epicenter (km)
 $D =$ focal depth (km)
 $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, \varepsilon_1, a_2, b_2, c_2, \varepsilon_2 =$ regression coefficient

식 (3)을 통해 PGA가 산정되면 시설물 특성에 따른 기능함수(Functionality Curve)를 도출하여야 한다. 본 연구에서는 FEMA(2003)의 보고서에 제시한 전력 시스템의 손상 알고리즘을 적용하여 발전소와 변전소의 기능 저하를 계산한다. 해당 알고리즘은 미국 지역의 재난 사례를 기반으로 하고 있으나 선행연구를 통해 미국 외 지역에서의 적용성을 확인할 수 있다. (Giovinazzi and King 2009, Tsuruta 2008). Table 1은 최대발전용량 200MW이상의 중/대형 발전소와 송전전압 150kV에서 350kV 사이의 중간 전압 변전소의 손상단계별 PGA의 평균과 표준편차를 정리한 것이며, Table 2는 복구 기간에 따른 기능회복율을 제시한 것이다.

Table 1. Damage Algorithms for Electric Power System

Classification	Damage State	Median (PGA, g)	β
Medium / Large Generation Facilities (200MW and above)	slight/minor	0.10	0.60
	moderate	0.25	0.60
	extensive	0.52	0.55
	complete	0.92	0.55
Medium voltage Electric Substation (150kV to 350kV)	slight/minor	0.15	0.60
	moderate	0.25	0.50
	extensive	0.35	0.40
	complete	0.70	0.40

Table 2. Restoration Functions for Electric Power System

Classification	Damage State	after 1 day (%)	after 3days (%)	after 7days (%)	after 30days (%)	after 90days (%)
Generation Facilities	slight/minor	100	100	100	100	100
	moderate	24	44	83	100	100
	extensive	16	19	24	65	100
	complete	2	2	3	13	80
Electric Substation	slight/minor	50	100	100	100	100
	moderate	9	50	100	100	100
	extensive	4	13	50	100	100
	complete	3	4	7	50	100

이를 기반으로 도출한 라이프라인 시스템의 기능곡선은 Fig. 4처럼 대수정규누적확률분포(Log-normal Cumulative Probability Distribution)를 따르며, 특정한 수준의 PGA에서 발전소와 변전소의 기능 저하를 보여준다. Fig. 4에 의하면 발전소와 변전소 모두 PGA 0.2g(중력가속도 9.8%) 이상에서 50% 내외의 기능저하가 발생하게 된다. Fig. 5는 선형그래프(Linear Graph) 형태의 손상 단계별 복구곡선으로 손상된 전력시설을 본래의 상태로 회복시키기 위해 소요되는 복구 기간을 나타낸다. Fig. 5를 통해 같은 정도의 기능을 회복하는 과정이라 할지라도 초기손상도가 클수록 복구에 오랜 시간이 걸리는 것을 확인할 수 있다.

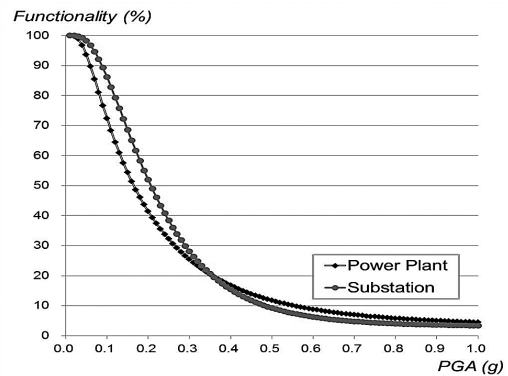


Fig. 4. Functionality Curve for Electric Power System

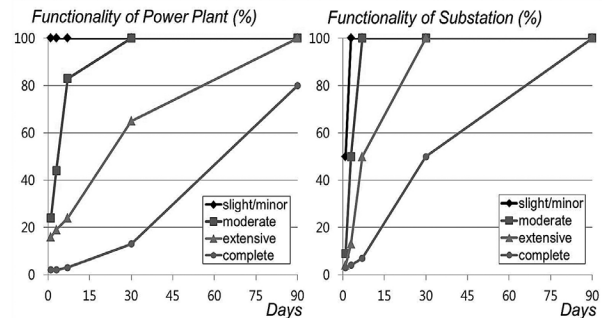


Fig. 5. Restoration Curve for Electric Power System

3.3.2 상호의존성을 고려한 연쇄피해 평가

전력 네트워크의 구성요소 손상에 따른 시스템 기능저하에 의해 2차적으로 발생하는 연쇄피해를 추정하기 위해 본 연구는 Haimes(2001)가 제안한 레온티에프의 사회기반시설 투입-산출모형을 활용한다.

$$C = (E - I)^{-1} \times F \quad (4)$$

where, C = cascading failure matrix
 E = unit matrix
 I = interdependency matrix
 F = initial failure matrix

이 때 개의 노드로 구성된 네트워크에서 식 (4)의 와 는 각 개별 노드의 연쇄 피해와 초기 피해를 나타내는 행렬을 의미한다. 예를 들어 Fig. 6과 같이 6개의 노드로 구성된 네트워크 내 노드 5가 지진으로 인해 손상되어 25%의 초기 피해를 입었다면 가 된다. 또한 노드 5에는 상위 노드 1, 2, 3, 4의 초기 피해정도에 따라 추가적인 연쇄 피해가 발생하는 데 이 값은 노드 간의 상호의존성에 의해 산정될 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ \vdots \\ C_{n1} \end{bmatrix} \quad (5) \quad F = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ \vdots \\ F_{n1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

개별 노드 간의 상호의존성은 한 노드의 초기피해가 다른 노드로 전이될 확률을 의미하며, 상호의존행렬을 통해 표현된다. 따라서 상호의존행렬 I의 성분 는 노드 가 손상되었을 때 노드 가 손상될 조건부 확률로 예측할 수 있으며 다음과 같이 도출된다.

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2n} \\ \dots & \dots & I_{ij} & \dots \\ I_{n1} & \dots & \dots & I_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_{ij} = \begin{cases} P(\text{Failure } N_i | \text{Failure } N_j) & (\text{if } A_{ij} = 1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

이 때 의 값은 노드 로 도달하는 임의의 경로 중 링크 가 포함되어 있는 경로를 선택할 확률과 같으므로, 아래 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} & P(\text{Failure } N_i | \text{Failure } N_j) \\ &= \frac{1/(\text{length of path that contains link } (N_j, N_i))}{\sum_{k=0}^n (1/(\text{length of path that contains link } (N_k, N_i)))} \quad (9) \\ & \text{where, } 0 \leq j \leq n \end{aligned}$$

예를 들어, Fig. 6의 네트워크에서 노드 5로 도달하는 경로는 $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5$ (경로길이 = 5)와 $N_2 \rightarrow N_4 \rightarrow N_5$ (경로길이 = 2.5) 두 가지이며, 이때 링크 (N_3, N_5) 를 포함하는 경로를 선택할 확률은 경로 길이에 반비례 하므로 노드 3과 5의 상호 의존성 $I_{53} = \frac{1/5}{1/5 + 1/2.5} = 0.33$ 이 된다. 따라서 각 노드의 초기손상을 Table 3처럼 가정하면 예시 네트워크의 상호의존 및 연쇄피해행렬은 Table 4와 같다.

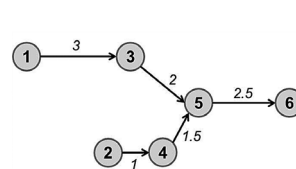


Fig. 6. Example: Network Path

Table 3. Example: Initial Failure

Node	Initial failure
1	0.1
2	0.25
3	0.15
4	0.3
5	0.25
6	0.2

Table 4. Example: Interdependency and Cascading Failure Matrix

	Interdependency						Cascading failure
	1	2	3	4	5	6	C
1	0	0	0	0	0	0	0.10
2	0	0	0	0	0	0	0.25
3	1	0	0	0	0	0	0.24
4	0	1	0	0	0	0	0.48
5	0	0	0.33	0.67	0	0	0.55
6	0	0	0	0	1	0	0.63

3.4 에이전트기반 라이프라인 기능회복 모델

본 연구의 에이전트기반 라이프라인 기능회복 모델은 피해 지역 내 전력 네트워크의 발전소, 변전소 및 소비자를 에이전트로 정의하였으며, 각 에이전트의 공간적 특성(위도, 경도, 링크 정보)과 발생한 지진의 진원지 위치, 진도, 진원 깊이를 반영한 기능 저하를 산정한다.

본 연구는 라이프라인 시스템의 상호의존에 의해 결정되는 재해의 파급효과를 확인하기 위해 Haimes가 제시한 연쇄피해평가방법(식 (4))을 적용하였으며 이 때 투입 식으로써 FEMA에서 제시한 전력 네트워크의 물리적 손상 알고리즘(Fig. 4)과 본 연구에서 제시한 상호의존성평가(식 (9))를 사용하였다. 이를 통해 초기 피해 및 상호의존성, 연쇄 피해가 산정된 에이전트들은 정의된 행동규칙이나 주변 환경의 변화를 학습하여 한정된 복구 자원을 두고 자율적인 의사결정을 한다. 이 때 복구자원배분계획에 따라 에이전트들의 복구 우선순위가 선정되며, 복구곡선에 따라 기능이 회복된다.

따라서 본 모델을 통해 발생 가능한 재난 상황에 대한 라이프라인 시스템의 피해를 예측할 수 있으며, 다양한 복구 자원배분계획을 수립하여 시뮬레이션함으로써 각 대안이 갖는 효율성을 측정할 수 있다.

4. Case Study

본 장에서는 구축된 라이프라인 기능회복 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실제 재난 사례를 대입한 시뮬레이션 결과를 분석한다. 현재까지 국내에는 지진으로 인해 전력 네트워크가 손상된 사례가 없기 때문에 본 연구에서는 일본의 2011 도호쿠(Tohoku) 지역 대지진을 사례로 선정하며 재난 이후 전력 공급이 모두 중단된 도호쿠 지역의 아오모리(Aomori), 이와테(Iwate), 아키타(Akita)현을 분석 범위로 한다. 추가적인 지진의 개요와 피해현황은 Table 5와 같다. 또한 해당 지역 내 화력 발전소 3곳과 변전소 11곳이 전력 네트워크를 구성한다고 가정하며, 이는 방향성 있는 24개의 링크로 연결된다. 분석대상 지역의 전력네트워크에 대한 정보는 Fig. 7과 Table 6에 정리한다.

Table 5. Summary of the 2011 Tohoku Earthquake

Item	Description
Date and Time	2:46 p.m. on Friday March 11, 2011
Epicenter	(Longitude, Latitude) (142.37E, 38.82N)
	Magnitude 9.0
	Focal Depth 24 km
Black out Area	All area of Aomori, Iwate, Akita and Miyagi Almost all area of Yamagata Partial area of Fukushima and Nigata
Maximum number of blackout	4,659,265 households

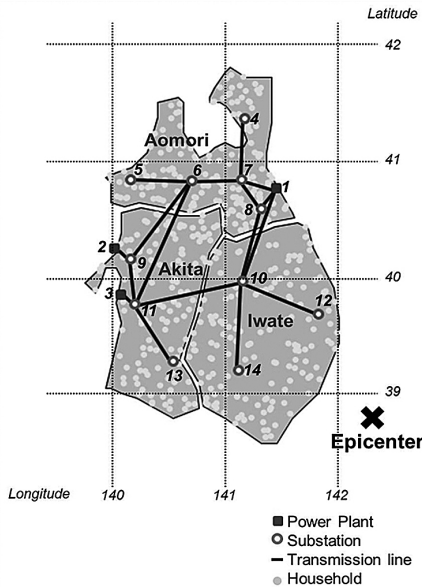


Fig. 7. Electric Network of Tohoku Region

Table 6. Links in the Tohoku Electric Network

Link ID	Start Node	Finish Node	Length (m)	Link ID	Start Node	Finish Node	Length (m)
a	1	7	27,984	m	8	7	32,303
b	1	8	23,134	n	8	10	70,933
c	1	10	93,352	o	9	6	85,973
d	2	9	4,073	p	9	11	42,824

e	3	11	3,818	q	10	8	70,933
f	6	5	48,225	r	10	11	93,998
g	6	7	38,978	s	10	12	67,699
h	6	9	85,973	t	10	14	85,001
i	6	11	119,437	u	11	6	119,437
j	7	4	58,161	v	11	9	42,824
k	7	6	38,978	w	11	10	93,998
l	7	8	32,303	x	11	13	76,835

4.1 사례분석 결과

4.1.1 도호쿠 지역 전력 네트워크의 초기 손상도 평가

위에서 제시한 사례를 적용하여 라이프라인 기능회복 모델을 시뮬레이션한 결과 Table 7과 같이 전력네트워크를 구성하는 각 에이전트들의 초기 손상을 구할 수 있었다.

사례 전력 네트워크상의 모든 발전소 에이전트는 30% 이상의 기능 저하가 발생할 것이라 추정되었고 이에 따라 가동을 중지하여 전 지역의 전기 공급이 중단될 것을 예상할 수 있었다. 이는 실제로 지진 직후 도호쿠 지역 3개의 화력발전소 내 전 호기가 자동정지된 것과 유사한 결과이다.

또한 변전소의 경우 상대적으로 진원지에서 가까운 이와테 지역에 위치한 노드 12, 13, 14의 피해가 큰 것을 확인할 수 있었고, 진원지와와의 거리가 먼 아오모리 지역에 위치한 노드 4의 피해가 가장 작을 것으로 예측되었다. 이 역시 실제 아오모리 지역의 정전 피해는 지진 발생 이후 2일 내에 복구된 반면(2011년 3월 12일 22시 복구완료), 이와테 지역은 4주 후까지도 완전 복구가 되지 않은 결과와 유사하다(4월 7일 16시 기준 29,688가구 정전).

Table 7. Initial Failure of Agents

Node	Agent Definition	Initial Failure (%)	State
1	power plant	43.9	Shutdown
2	power plant	37.3	Shutdown
3	power plant	51.6	Shutdown
4	distribution substation	6.7	Slight
5	distribution substation	9.3	Slight
6	distribution substation	16.4	Slight
7	primary/distribution substation	22.1	Slight
8	primary/distribution substation	37.4	Slight
9	primary/distribution substation	23.5	Slight
10	primary/distribution substation	69.6	Moderate
11	primary/distribution substation	39.1	Slight
12	distribution substation	90.1	Extensive
13	distribution substation	78.0	Extensive
14	distribution substation	92.5	Extensive

4.1.2 도호쿠 지역 전력 네트워크의 상호의존성 및 연쇄피해 평가

Table 8은 앞서 제시한 상호의존성 및 연쇄피해 평가 방법을 토대로 사례 대상 지역의 상호의존행렬과 연쇄피해행렬을 구한 결과이다. 상호의존행렬의 각 성분은 두 노드 간의 관계를 나타내는데, 예를 들어 Table 8의 상호의존행렬

(5, 6)성분의 값이 1인 것을 통해 노드 6이 지진으로 인해 손상되어 가동 중지될 경우, 노드 5로 피해가 직결된다는 것을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 7로도 예측할 수 있다.

이때 상호의존행렬의 각 행을 더하면 특정 노드가 다른 노드에 얼마만큼 영향을 받고 있는지를 알 수 있다. 전력 네트워크의 시작점이 되는 노드 1, 2, 3의 경우 각 행의 합이 0으로 다른 노드에 영향을 받지 않으며, 그 외의 노드들은 모두 다른 노드의 상태 변화에 대해 영향을 받는다. 예를 들어 노드 11의 경우 근접하게 위치한 노드 3 발전소에서 전력을 공급받을 확률이 가장 크기 때문에 상호의존성 값이 0.91로 산정되고 다른 두 발전소의 영향은 미미하다. 이에 반해 노드 6은 모든 발전소와 연결되는 전력 공급 경로의 거리가 비슷하기 때문에 각 발전소와 연결된 인접 노드 모두에서 고루 영향을 받게 된다.

또한 상호의존행렬의 각 열의 합은 특정 노드가 전체 네트워크에 주는 파급효과라고 할 수 있다. 이 값이 상대적으로 클수록 연쇄피해를 발생시킬 확률이 높다. 사례 지역의 경우 노드 10의 상호의존행렬 열의 합이 가장 크고 그 다음 노드 11, 노드 1의 순서를 보인다. 이는 해당 노드들이 전력 네트워크의 상단부에 위치하면서 시작 노드로 하는 링크를 많이 보유하고 있기 때문임을 예상할 수 있다. 이와 달리 노드 6은 발전소와 직접 연결된 1차 변전소는 아니지만 시작 노드로 하는 링크가 4개로 상대적으로 큰 값을 가지며, 특히 노드 5와의 상호의존성이 1인 관계로 전체 네트워크에 미치는 파급효과가 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 8. Interdependency and Cascading Failure Matrix

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	CF(%)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43.9
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37.3
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51.6
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	87.1
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0
6	0	0	0	0	0	0	0.44	0	0.33	0	0.24	0	0	0	95.4
7	0.72	0	0	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	80.4
8	0.78	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0.11	0	0	0	0	96.1
9	0	0.9	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0.08	0	0	0	66.5
10	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.62	0	0	0	100.0
11	0	0	0.91	0	0	0	0	0	0.07	0.02	0	0	0	0	93.5
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	100.0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	100.0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	100.0
sum	1.88	0.9	0.91	0	0	1.3	1.55	0	0.4	2.13	1.93	0	0	0	-

4.1.3 사례적용결과와 실제 도호쿠지역 데이터 비교분석

도호쿠전력(Tohoku-EPCO)에 따르면 2011년 도호쿠 지진 직후 아오모리, 이와테, 아키타 현 내 총 2,337,804가구가 정전 피해를 입었으며 지진 발생 80시간 후인 3월 14일 10시에 94%이상 회복된 것으로 집계되었다. 이 때 변전소의 복구를 위해 투입된 인력은 평균적으로 하루에 490명

이었다(Kuwata and Ohnishi 2012). 이를 본 연구에서 개발한 라이프라인 기능 회복모델의 복구 자원으로 설정하고 한정된 자원을 각 변전소에 동일하게 분배했다는 것을 기본 가정으로 하여 시뮬레이션한 결과는 Fig. 8과 같다. 이를 통해 비교적 지진의 피해가 적은 Aomori현의 복구가 빨리 진행되었음을 확인할 수 있었으며, 전력 네트워크의 말단인 노드 12, 13, 14 주변의 가구는 전체 시스템의 복구가 끝날 때 까지 정전 피해를 입을 것으로 예상되었다.

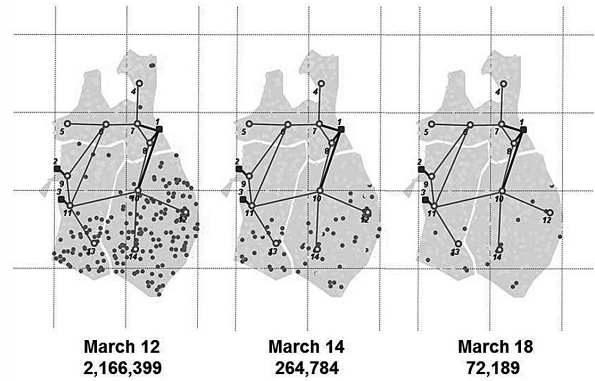


Fig. 8. Number of Households in Blackout

Table 9는 위의 시뮬레이션 결과로 도출된 정전 가구 수를 도호쿠 전력에서 제공한 실제 정전가구 수와 비교한 것이다. 이에 따르면 시뮬레이션 결과가 실제 데이터에 비해 최대 5%정도 복구가 더디게 진행되었는데 본 연구가 재난 시 사용 가능한 예비전원 등을 포함하지 않은 것을 고려한다면 의미 있는 결과이다. 또한 본 모델의 목적이 정확한 예측 값의 도출보다는 복구 계획으로 인해 발생 가능한 결과들을 보여주어 더 나은 계획을 선정하는 것을 지원하는 데 있기 때문에 허용할 수 있는 수준의 오차로 사료된다.

Table 9. Comparative Analysis of Actual Data and Simulation Result

	Percentage of Households in Blackout	
	Actual Data from Tohoku-EPCO (%)	Simulation Result (%)
after 1 day	89.1	92.7
after 3 days	6.1	11.3
after 7 days	2.2	3.1

4.2 기능 손실을 고려한 복구 자원 계획

본 연구의 라이프라인 기능회복 모델은 복구의 목적 및 외부 조건에 따라 다양하게 수립될 수 있는 복구계획에 따른 복구 과정을 시뮬레이션할 수 있도록 지원함으로써 어떠한 복구계획을 선택하는 것이 효과적인지 확인할 수 있도록 한다.

Fig. 9는 앞서 제시된 도호쿠 지역 지진에 대해 다양한 복구계획을 수립하여 이에 따른 정전 가구 수를 시물레이션한 것이다. 이 때 매일 공급되는 복구 자원은 복구계획에 상관 없이 모두 같으며, 발전소는 가장 피해가 클 것으로 예상되는 노드 3의 발전소가 운전을 재개한 3월 12일 오전 10시부터 정상 가동하였다고 가정하였다.

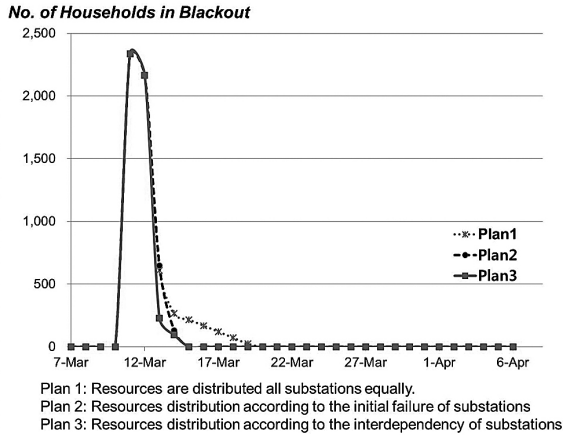


Fig. 9. Restoration plan analysis

이때 앞선 비교분석에서와 같이 한정된 복구자원을 모든 변전소에 균등하게 배분할 것인지(Plan 1 in Fig. 9), 초기 피해가 큰 변전소에 우선적으로 배분할 것인지(Plan 2 in Fig. 9), 상호의존행렬 열의 합이 큰 에이전트에게 우선적으로 배분할 것인지(Plan 3 in Fig. 9)에 대하여 복구계획을 수립하고 시물레이션하였다. 그 결과 모든 변전소에 자원을 균등하게 배분하는 첫 번째 복구계획보다는 우선순위를 선정하여 자원을 집중 배분하는 두, 세 번째 복구계획이 피해지역의 기능손실을 줄이는 데 유리하다는 것을 알 수 있었다. 특히 이 중에서도 상호의존성이 큰 변전소의 복구를 먼저 진행하여 연쇄피해효과의 발생을 완화시킨 세 번째 복구계획이 전체 지역 내 정전가구를 줄이는데 효과적이었다.

본 시물레이션 결과를 통해 같은 양의 자원을 사용했음에도 불구하고 재난 초기의 기능회복에 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 적절하지 않은 복구계획으로 인해 자원을 유효하게 쓰지 못할 수 있음을 시사하며 이를 통해 효율적인 복구 자원 할당계획의 필요성을 다시 한 번 강조할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 재난 이후 라이프라인 네트워크 및 상호의존성을 고려한 복구계획의 수립은 지역 내 피해의 확산을 방지하기 위해 매우 중요하다는 데 입각하여, 상호의존성 기

반의 라이프라인의 손상도 평가 방법을 제시하였다. 또한 재난 이후 효율적인 라이프라인의 복구 자원 할당계획 수립을 위해 전력 네트워크에 한정하여 라이프라인 기능회복 모델을 제시하였고, 해당 모델을 2011년 도호쿠 지역 대지진의 사례에 적용하여 제시한 모델의 유효성을 검증하였다.

그 결과 라이프라인 네트워크를 구성하는 개별 에이전트들이 외부 환경 및 다른 에이전트들과 상호작용하여 초기 피해의 단순 합계로는 예측할 수 없었던 연쇄피해와 같은 창발효과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 재난 이후 지역사회의 기능 회복을 위해 전체 네트워크에 파급효과가 커 연쇄피해를 야기할 수 있는 라이프라인 구성요소부터 복구 자원을 우선으로 투자해야 함을 시사 하였다.

본 연구에서 구축된 라이프라인 기능회복 모델은 지역적으로 분산되어 있고 복잡한 의존관계로 인한 불확실성을 갖고 있는 라이프라인 네트워크를 이해하는데 도움이 될 수 있다. 또한 본 모델을 통해 라이프라인 관리자들에게는 재난 이후 지역수준의 복구 계획 수립 시 복구 자원 할당의 우선순위선정과 같은 의사결정을 지원할 수 있으며, 지역 내 개별 시설물 관리자들에게는 라이프라인의 복구가 언제 완료 되어 서비스를 공급받을 수 있는지를 예측할 수 있게 해준다.

그러나 본 연구는 확률론적인 방법을 기반으로 손상도 평가 및 복구기간을 추정하고 있으므로, 연구의 결과에 보다 신뢰성을 높이기 위해 복구 자원의 수급이나 복구공사 진행과정에 대한 추가적인 연구를 할 필요성이 있다. 또한 향후 연구를 통해 전력시설뿐만 아니라 상수도나 가스시설과 같은 다른 라이프라인으로 범위를 확장하여 개발 모델을 보완할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 '건설교통기술촉진 연구사업'(과제번호:12TRPI-C064106-01) 연구과제의 일부임.

References

American Lifelines Alliance (ALA) of Federal Emergency Management Agency (2006). "Power Systems, Water, Transportation and Communications Lifeline Interdependencies."
 Bonabeau, E. (2002). "Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems." Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(3), pp. 7280-7287.

- Chang, S. E. and Miles, S. B. (2004). "The dynamics of recovery: A framework." , In: Modeling the spatial economic impact of disasters. Springer-Verlag, USA.
- Chou, C. and Tseng, S. (2010). "Collection and Analysis of Critical Infrastructure Interdependency Relationships." J. Comput. Civ. Eng., 24(6), pp. 539-547.
- Comfort, L.K. et al. (2004). "Coordination in Rapidly Evolving Disaster Response Systems." American Behavioral Scientists, 48(3), pp. 295-313.
- Duenas-Osorio, L. et al. (2007). "Seismic response of critical interdependent networks." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(2), pp. 285-306.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2003). "HAZUS-MH Technical Manual." <http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1716-25045-6422/hazus_mr4_earthquake_tech_manual.pdf> (Jan., 19, 2014)
- Giovinazzi, S. and King, A. (2009). "Estimating Seismic Impacts on Lifelines: An International Review of Risk Scape," Proceedings: 2009 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference.
- McDaniels, T. et al. (2007). "Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependency." J. Infrastruct. Syst., 13(3), pp. 175-184.
- Haimes, Y. and Jiang, P. (2001). "Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures." J. Infrastruct. Syst., 7(1), pp. 1-12.
- Hwang, J. (2008). "The Allocation Precedence of the Limited Same Resource to the Concurrent Activities under Multiple Criteria." Korean journal of Construction Engineering and Management, KICEM, 9(5), pp. 159- 167.
- Janssen, M. A. and Ostrom, E. (2006). "Empirically based, agent-based models." Ecology and Society 11(2): p. 37.
- Kameda, H. (2000). "Engineering Management of Lifeline Systems Under Earthquake Risk." Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, IAEE, Tokyo, Japan.
- Kanno, T. et al. (2006). "A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data." Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3), pp. 879-897.
- Kazama, M. and Noda, T. (2012). "Damage Statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage." Soils and Foundations, 52(5), pp. 780-792.
- Kim, J. and Cho, Y. (2010). "A Study on the Proposals for Improvement of the National Emergency Management System based on Past Disaster Cases." Korean journal of Construction Engineering and Management, KICEM, 11(5), pp. 24-31.
- Kuwata, Y. and Ohnishi, Y. (2011). "Emergency-response capacity of lifelines after wide-area earthquake disasters." Proc., Int. Symp. on Engineering Lessons Learned from the Great East Japan Earthquake, PEER at UC Berkeley, Berkeley, CA.
- Lambert, J. and Patterson, C. (2002). "Prioritization of Schedule Dependencies in Hurricane Recovery of Transportation Agency." Journal of Infrastructure Systems, 8(3), pp. 103-111.
- O' Rourke, T. D. (2007). "Critical infrastructure, interdependencies, and resilience." The Bridge: Linking Engineering and Society, 37(1), pp. 22-29.
- Peerenboom, J. P. and Fisher, R. E. (2007). "Analyzing Cross-Sector Interdependencies." Proceedings of the 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS, Hawaii, USA, pp. 112-119.
- Petak, W. (1985). "Emergency Management: A Challenge for Public Administration." Public Administration Review, 45(special issue), pp. 3-7.
- Rinaldi, S. M. (2004). "Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies." Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS, Hawaii, USA.
- Rose, A. et al. (1997). "The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions." Journal of Regional Science, 37, pp. 437-458.
- Sanford Bernhardt and McNeil, S. (2008). "Agent-

- Based Modeling: Approach for Improving Infrastructure Management.” J. Infrastruct. Syst., 14(3), pp. 253-261.
- Tohoku Electric Power Company(2011). “Annual Report 2011.” <<https://www.tohoku-epco.co.jp/ir/report/pdf/ar2011.pdf>> (Jan., 13, 2014)
- Tsuruta, M. et al. (2008). “Damage Propagation Caused by Interdependency Among Critical Infrastructures.” Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, IAEE, Tokyo, Japan.
- Wu, J. and Dueñas-Osorio, L. (2013). “Calibration and validation of a seismic damage propagation model for interdependent infrastructure systems.” Earthquake Spectra, 29(3), pp. 1021-1041.

요약 : 재난 이후 라이프라인의 손상은 지역사회 내 공공서비스의 제공을 지연시켜 서비스를 필요로 하는 시설물로 피해를 확산시킬 수 있다. 이에 라이프라인의 정확한 피해 평가를 기반으로 한 신속한 라이프라인의 복구가 요구되고 있으나, 라이프라인 구성요소간의 복잡한 의존관계와 네트워크적 성격으로 인해 복구계획을 수립하는데 어려움이 따른다. 또한 라이프라인의 위험도 평가 및 영향력 분석과 같은 기존의 연구들 역시 라이프라인 구성요소 간의 상호작용을 확인하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 에이전트 기반 모델을 활용하여 라이프라인 구성요소가 전체 네트워크시스템에 발현하는 연쇄피해효과를 확인하고, 라이프라인 간 상호의존성을 고려한 라이프라인 기능회복 모델을 제시하고자 한다. 이를 통해 전체 네트워크에 파급효과가 큰 라이프라인 구성요소에 우선적으로 복구 자원을 할당할 수 있도록 지원하여, 라이프라인 서비스 공급 중단으로 인한 사회의 피해확산을 경감시킬 수 있을 것이라 기대된다.

키워드 : 재난 복구, 라이프라인, 상호의존성, 회복력, 에이전트기반모델
