

미래 자원환경지질 분야로서 국가기반시설 리질리언스 연구 동향 분석

유 순 영*

국가수리과학연구소 계산수리과학연구부

A Review of Critical Infrastructure Resilience Study as the Future Area of Geosciences

Soonyoung Yu*

National Institute for Mathematical Sciences (NIMS), Yuseong-gu, Daejeon 305-390, Korea

Critical infrastructure resilience has been integrated in critical infrastructure protection in US after Department of Homeland Security recognized that protection, in isolation, is a brittle strategy. Here “resilience” is the system’s ability to efficiently reduce both the magnitude and the duration of systemic impacts after hazards, and quantitatively assessed as a resilience cost. The resilience cost is the sum of systemic impacts and recovery efforts, and many case studies on resilience costs show that the recovery effort should be included in resilience assessment. This paper explains how the resilience cost is defined and quantified with a case study.

Key words : critical infrastructure, resilience cost, systemic impact, recovery effort

미국에서는 재난으로 인한 기반시설물의 피해를 줄이기 위해 국가기반시설 리질리언스 확보가 국가기반시설보호계획에 활용되고 있다. 여기서 “리질리언스”는 재난으로 인한 시스템의 영향을 효율적으로 줄일 수 있는 기반시설 시스템의 능력으로, 리질리언스 비용으로 정량화가 시도되었다. 리질리언스 비용은 시스템 영향과 복구노력을 합한 것으로, 리질리언스 평가 사례는 리질리언스 평가시 복구노력을 고려할 필요가 있음을 보여주고 있다. 본 논문은 리질리언스 비용을 설명하고, 연구 사례를 통해 리질리언스 비용의 평가 방법을 보여주고자 한다.

주요어 : 국가기반시설, 리질리언스 비용, 시스템 영향, 복구노력

1. 서 언

현대인의 삶에 있어 필수불가결한 국가기반시설(critical infrastructure로 “핵심기반시설” 또는 “주요기반시설”로 번역할 수 있으나, “재난 및 안전관리기본법”에 근거하여 “국가기반시설”로 번역)은 자연재난, 인적재난, 의도적 범죄 행위 등 다양한 위협 요인에 노출되어 있다. 국내 국가기반시설의 피해 사례로는 이상고온으로 인한 9.15 대규모 정전 사건, 국제정세 불안과 자연재해로 인한 유가 수급 불균형 및 농협 전산장애 등이 있고, 해외 사례로는 9.11 테러 사건 직후 미국의 기반체계가 마비 현상이 있다. 이에 우리나

라를 비롯한 많은 나라들이 지속 가능한 국가 발전을 위해 국가기반시설을 지정, 보호하고 있다.

국내 국가기반시설은 “재난 및 안전관리기본법” 제 25조의2제1항에 따라 지정되며, 그 기준은 1) 다른 기반시설이나 체계 등에 미치는 연쇄효과, 2) 둘 이상의 중앙행정기관의 공동대응 필요성, 3) 재난이 발생하는 경우 국가안전보장과 경제·사회에 미치는 피해 규모 및 범위, 4) 재난의 발생 가능성 또는 그 복구의 용이성이다. 2011년 10월 현재 국내에는 그 기능이 마비될 경우 인명과 재산 및 국가 경제에 심각한 영향을 미칠 수 있는 물적, 인적 체계로써 지속적으로 관리할 필요가 있다고 인정되는 시설로, 에너지, 정보통신, 교통수

*Corresponding author: s7yu@nims.re.kr

송, 금융, 보건의료, 원자력, 환경, 식용수 등 9개 분야 250개 시설이 국가기반시설로 지정·관리되고 있다.

해외의 사례로서 국가기반시설 보호 정책은 1998년 대통령 명령 63호(PDD-63)로 명시 규정된 미국의 국가기반시설보호(Critical Infrastructure Protection, CIP)이다. 이후 미국은 911 테러 사건을 겪으며 국토안보부(Department of Homeland Security, DHS)를 신설하고, 국가기반시설보호 업무를 총괄하도록 하고 있다. 미국 국토안보부의 국가기반시설보호계획(National Infrastructure Protection Plan, NIPP)은 개별적으로 수행되던 기반시설보호 노력을 단일 국가 프로그램에 통합하여, 국가기반시설 및 주요자산(CIKR, Critical Infrastructure and Key Resources)의 보호를 강화하고 리질리언스를 확보하고자 한다(DHS, 2009). 여기서 “리질리언스”는 특정 시스템이 외부력에 의해 야기되는 변화 압력에 견디는 능력으로, 탄성력, 회복력, 복원력으로 번역될 수 있으며, 방재력으로도 번역된 바 있다(NIDP, 2010). “국가기반시설 리질리언스”는 재난으로 인한 피해 규모 및 피해 시간을 효율적으로 줄일 수 있는 국가기반시설 시스템의 능력으로, 비즈니스 연속성 관리에서 연구되고 있는 “비즈니스 리질리언스”의 “리질리언스”와 유사한 개념이다(Yoo, 2009).

미국 국토안보부는 물리적인 보호만으로는 기반시설의 피해를 막을 수 없음을 인지하고, 국가기반시설 리질리언스(Critical Infrastructure Resilience, CIR)를 CIP에 포함시키기 시작하였다. 2005년 구성된 국토안보부의 국가기반시설 태스크포스는 국가기반시설 리질리언스를 기반시설보호를 위한 최우선 과제로 지정한 바 있다. 그러나 리질리언스 개념을 기반시설보호에 활용하기 위해서는 다양한 기반시설에 일관되게 적용할 수 있는 리질리언스의 정의와 객관적인 측정방법이 필요하다. 이에 국토안보부의 과학기술실(Science and Technology Directorate)은 국가기반시설 및 주요자산(CIKR)의 리질리언스 확보 방법을 찾고 리질리언스를 정량적으로 평가하기 위해 샌디아국립연구소에 리질리언스 평가 연구를 의뢰하였다. 샌디아국립연구소는 과학기술을 기반으로 국가 안보 정책을 개발하는 연방정부 에너지부(Department of Energy) 소관의 국립연구소로, 핵무기, 방위산업체계, 에너지/기후/기반시설 안보, 국내외 국가 안보 및 핵 안보 등을 연구한다. 국가기반시설 리질리언스는 기반시설 안보(Infrastructure Security)와 관련하여 수행되고 있는 연구이다.

본 논문은 미국 국토안보부의 국가기반시설 리질리언스 연구를 소개하고, 리질리언스의 정량적 측량을 위

해 고안된 리질리언스 비용(resilience cost)을 연구사례와 함께 설명하고자 한다.

2. 국가기반시설

국가기반시설을 보호하고 리질리언스를 확보하기 위해서는 기반시설의 특성을 이해할 필요가 있다(Fig. 1). 국가기반시설은 첫째, 다른 기반시설의 상태에 영향을 받는 의존성(dependency)을 보인다. 예를 들면, 전력 공급의 중단은 지하철 운행 및 물류 수송에 차질을 준다. 둘째, 기반시설은 상호 의존(interdependency)한다. 즉, 앞서 말한 것처럼 정전사태는 물류 수송에 차질을 주고, 역으로 원활하지 못한 물류 수송은 전력을 재생산하는데 필요한 연료의 공급에 차질을 주어 정전 사태를 더욱 악화시킬 수 있다. 마지막으로 기반시설은 연쇄 파급 효과(cascade)를 가진다. 즉, 정전으로 물류가 제대로 수송되지 못하면 국내의 산업활동이 위축될 수 있다. 앞서 언급한 국내 “재난 및 안전관리기본법” 제25조의2제1항 국가기반시설 지정 기준도 이들 특성을 반영하고 있다.

Fig. 1의 국가기반시설 특성으로 인해, 국가기반시설 리질리언스를 확보하기 위해서는 기반시설의 물리적 상태와 함께 기반시설 시스템을 이해할 필요가 있다. 예를

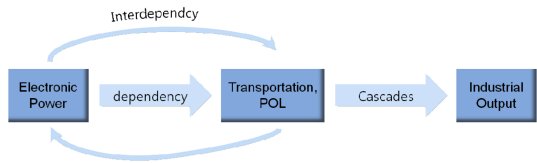


Fig. 1. Characteristics of critical infrastructures: Dependency, Interdependency, and Cascade.

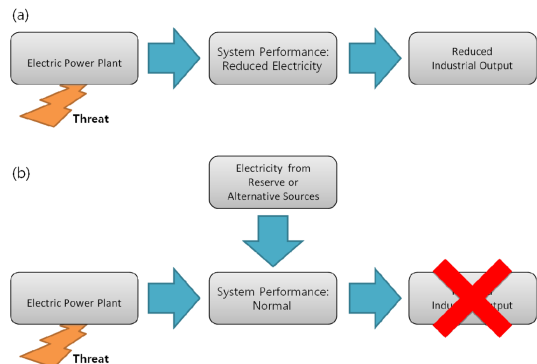


Fig. 2. Electric Power Distribution System: (a) less resilient to a threat (b) more resilient to the same threat.

들어 전력공급의 경우, 전력공급시설물의 파손으로 전력 공급량이 부족해져 산업활동이 위축될 수 있다(Fig. 2-a). 하지만 리질리언스가 확보된 시스템의 경우, 다른 전력원으로부터 전력이 공급되거나, 비축된 전력이 공급되어, 전력공급 시설물의 파괴에도 불구하고 전력 공급 시스템은 정상 운행되고, 이로 인해 연쇄피해 현상도 나타나지 않는다(Fig. 2-b). 리질리언스 확보는 Fig. 2-b 와 같이 어떤 사고에도 제 기능을 수행하는 기반시설 시스템을 구축하는 것이라 할 수 있다.

외부 위협으로부터 기반시설 시스템을 보호하고 이의 성능을 유지하기 위해서는 기반시설 시스템에 대한 이해를 기초로 다음과 같은 물음에 해답을 찾을 필요가 있다. 첫째, 어떤 기반시설 시스템이 더 위험하며, 왜 위험한가? 둘째, 국가기반시설물의 상호 의존성이 어떻게 위험을 증가시키는가? 셋째, 기반시설물이 왜 위협요인에 취약해지는가? 넷째, 기반시설의 위험이 국가안보에 어떻게 영향을 미치는가? 다섯째, 어떻게 위험을 줄일 수 있는가? 등이다(Aamir, 2011). 미국의 국토안보부는 샌디아국립연구소와 같은 국립연구소를 통해 최선의 과학 기술을 활용하여 위 문제에 대한 해답을 찾고자 한다.

3. 샌디아국립연구소의 국가기반시설 리질리언스 연구 개요

샌디아국립연구소는 국가안보 의사결정에 중요한 지

식 정보를 취합하기 위해 상호의존성 및 피해영향 연구팀(Interdependence and Consequence Effects Group)을 운영 중에 있다. 이 연구팀은 현재 다양한 리질리언스 연구 프로그램을 진행 중에 있는데, 이 중 2001년 미국 애국법(USA Patriot Act) 제정과 함께 설립된 국가기반시설 모의분석센터(NISAC, National Infrastructure Simulation and Analysis Center)는 국토안보부 내 모형(modeling), 모의(simulation), 분석(analysis) 프로그램으로, 샌디아국립연구소와 함께 로스알라모스국립연구소에 의해 운영되고 있다. NISAC은 기반시설물 파괴로 인한 상호 의존현상 및 경제적, 안보적 피해결과를 다양한 과학기술로 분석하여 국가의 의사 결정을 돕고자 하며, 이를 위해 기반시설보호에 필요한 모형, 모의, 분석 결과를 연방정부, 주정부 및 지자체에 제공한다. 복잡한 기반시설 시스템을 이해하기 위해 공정에 기초한 시스템 다이내믹스 모델(process-based systems dynamics models), 수리과학에 기초한 네트워크 최적화 모델(mathematical network optimization models), 물리현상에 기초한 수치모델(physics-based models), 행위자기반모델(agent-based simulations) 등 다양한 연구 방법들을 고안해 내고 있다. Table 1은 NISAC이 분석한 재난들로 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)이 재난 이후 대응 및 복구 전략 수립에 집중한다면, NISAC은 기 발생한 재난 분석 결과를 바탕으로 재난 이전 리질리언스 확보에 주력하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Selected NISAC(National Infrastructure Simulation and Analysis Center) Analysis

| Year | Threats | Remarks |
|------|---|--|
| 2011 | -Cascadia Subduction Zone (CSZ) | -High probability that the CSZ will produce earthquakes of magnitude 8.0 or higher in the next 50 years. |
| 2010 | -Deepwater Horizon Oil Spill -Icelandic Volcanic Ash Cloud | -Impact analyses. |
| 2009 | -H1N1 Swine Flu | -Used impact analyses to plan for 2009-2010 flu season. |
| 2008 | -New Madrid Earthquake Impacts | -Used results in developing the National Strategic Plan for a New Madrid Seismic Zone event. -provided information on infrastructure impacts for better planning efforts and design mitigation measures at local, regional and national levels. |
| 2007 | -Long-term Analysis on the Impacts of Hurricane Katrina -I-35W Bridge Collapse | -Provided information for DHS event response |
| 2006 | -H5N1 Pandemic Influenza Study | -Used for the national Pandemic Influenza plan -influenced CDC ¹ /HHS ² community containment strategy |
| 2005 | -Hurricane Katrina -Hurricane Rita | -Hurricane Pre-landfall impact analyses -Provided information for DHS pre-event planning, deployment for the events, post-event security priorities. |

¹Center for Disease Control and Prevention, CDC

²Department of Health and Human Services, HHS

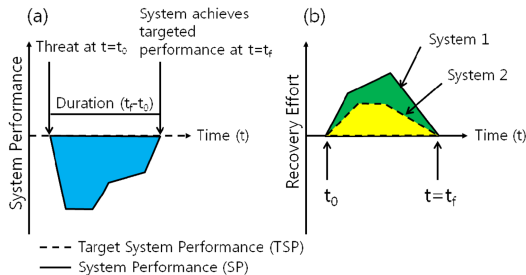
4. 리질리언스 비용

샌디아국립연구소는 CIP에 리질리언스 개념을 접목시키기 위해 리질리언스를 “특정 사건 발생시 기반시설의 성능(System Performance, SP)을 목표치(Target System Performance, TSP)로부터 크게 떨어트리지 않고, 목표치 이하의 성능을 보이는 시간도 짧게 줄일 수 있는 시스템의 능력”으로 새로이 정의하였다. 특히 기존의 리질리언스 연구와 달리(Vugrin *et al.*, 2010b), 리질리언스를 정의할 때 총복구노력(Total Recovery Effort, TRE)도 고려하고 있다. Fig. 3-a는 재난 발생 후 기반시설 시스템의 성능이 현저히 떨어지다가 시간이 지나면서 원래 상태로 회복되는 것을 보여주고 있다. Fig. 3-b는 Fig. 3-a의 시스템 교란이 목표치 성능으로 복구되는데 사용된 복구 노력으로, 시스템 1이 시스템 2보다 더 많은 복구 노력이 필요한 것을 알 수 있다. 기존 연구와 같이(Vugrin *et al.*, 2010b), 시스템 성능만 고려한다면(Fig. 3-a), 두 시스템의 리질리언스는 같으나, 복구 노력까지 고려하면(Fig. 3-b) 복구 노력이 적은 시스템 2가 시스템 1 보다 리질리언스가 더 확보된 경우라 할 수 있다.

이런 정의를 바탕으로 리질리언스를 정량화하기 위해 리질리언스 비용(Resilience Cost, RC)이 고안되어 식 (1)과 같이 정의되었다(Vugrin *et al.*, 2011).

$$RC = SI + \alpha \times TRE \tag{1}$$

여기서 SI는 시스템 영향(Systemic Impact, SI), TRE는 총복구노력(Total Recovery Effort), α 는 가중치 부여 및 단위 환산을 위한 계수이다. 즉 기반시설 시스템은 외부 위협 발생 후에도 기본 기능을 유지하기 위해 외부 위협에 대하여 흡수(absorptive), 적응



Source: Aamir (2011)

Fig. 3. Two primary components of resilience: (a) System Performance (SP), (b) Total Recovery Effort (TRE). In (a) TSP is Target System Performance.

(adaptive), 복구(restorative) 능력을 발휘하면서 시스템 영향(SI)을 표출하고 복구노력(RE)을 요구하는데, 이들 두 요소의 합이 식 (1)의 리질리언스 비용이 되는 것이다. 리질리언스 비용이 크면 시스템 영향이 크거나 총복구노력이 많이 소요된 것으로 시스템의 리질리언스가 좋지 않은 것으로 해석할 수 있다. 또한 Fig. 3-a의 시스템 성능 복구 양상은 Fig. 3-b의 복구 노력 방법에 따라 달라질 수 있고, 이에 리질리언스 비용(RC)은 특정 복구활동에 의한 리질리언스(Recovery Dependent Resilience, RDR) 비용

$$RDR(RE) = \frac{\int_0^{t_f} [TSP(t) - SP(t)] dt + \alpha \int_0^{t_f} [RE(t)] dt}{\int_0^{t_f} [TSP(t)] dt} \tag{2}$$

과 최적의 리질리언스(Optimal Resilience, OR) 비용

$$OR = \min_{RE} \frac{\int_0^{t_f} [TSP(t) - SP(t)] dt + \alpha \int_0^{t_f} [RE(t)] dt}{\int_0^{t_f} [TSP(t)] dt} \tag{3}$$

으로 구분될 수 있다(Vugrin *et al.*, 2011). 여기서, t_0 는 재난 발생 시점, t_f 는 복구 완료 시점이고, TSP(Target system performance)는 시스템 성능의 목표치로 재난 전후가 다를 수 있으며 시간에 따라 변할 수도 있다. SP(System Performance)는 시스템의 현재 성능으로, $|TSP(t) - SP(t)|$ 는 식 (1)의 시스템 영향(SI)을 표현한다. 또한 식 (2)의 RDR과 식 (3)의 OR은 식 (1)을 시스템 성능의 목표치(TSP)로 나누어 규모가 다른 시스템간의 비교가 가능하도록 하고 있다. 식 (1)-(3)은 복구노력이 고려됨으로써 리질리언스 평가가 훨씬 복잡해졌음을 보여준다. 식(2)와 식(3)에서 보듯이 리질리언스 비용은 복구노력의 함수로, 복구기간($t_f - t_0$) 및 리질리언스 비용(RC)은 복구노력에 따라 달라진다. 또한 역으로 복구기간 및 리질리언스 비용을 최소화시키는 복구노력도 계산할 수 있다.

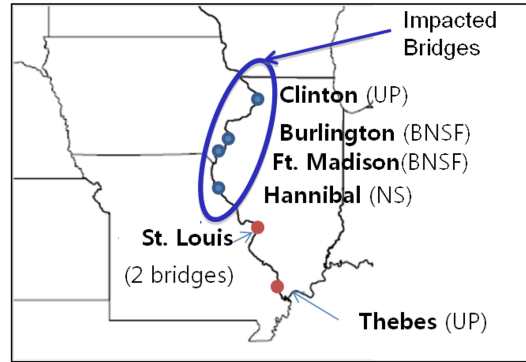
국가기반시설 리질리언스 연구의 목적은 위협 요인으로 인한 시스템 영향(SI)을 줄이거나 총복구노력(TRE)을 줄일 수 있는 시스템을 구축하여 리질리언스 비용을 줄이고자 하는 것으로, 리질리언스 연구를 위해서는 리질리언스 비용의 정량적 계산이 요구된다. 리질리언스 비용을 정량화하기 위해서는 위협 발생 후 SI와 시스템 정상화를 위해 소모되는 TRE의 시계열 자료가 필요하다. 그러나 관련 자료의 부족으로 리질

리언스 비용의 정량화는 쉽지 않다. 이에 실제 사건을 모의 발생시켜 볼 수 있겠으나, 비용이 많이 소모된다. 또한 전문가 의견에 기초한 SI 및 TRE 평가는 주관적인 견해의 개입으로 인해 부정확한 결과를 나올 수 있다. 이에 모형 및 모의가 대안으로 활용되고 있다. 모형 및 모의를 활용할 경우, 적은 비용으로 다양한 위험 요인 및 복구 시나리오에 따른 SI와 TRE를 평가해 볼 수 있다.

샌디아국립연구소는 현재 리질리언스 평가 프레임워크를 갖추고 있어, 재난 발생 후 24시간 이내 리질리언스 평가를 통해 최적의 복구 전략을 구축할 수 있다. 샌디아국립연구소의 리질리언스 프레임워크는 재난 발생 후 시스템이 자동 복구되는 상황도 고려한다. 즉 재난으로 인해 시스템의 성능이 떨어지면 바로 복구 노력이 시작되는 상황으로, 피드백 제어설계(feedback control design)가 리질리언스 정량화 연구에 활용되었다(Vugrin and Camphouse, 2011). 여기서 제어(control)란 시스템을 원하는 상태로 가져가려는 행위로, 국가 기반시설 리질리언스 연구에서는 복구노력(RE)이 제어 입력(control input)이 되어 기반시설의 성능(SP)을 목표치(TSP)로 이끌게 된다. 특히 시스템의 현 상태 정보를 활용할 경우, 피드백 제어(feedback control)라고 한다. 피드백 제어설계는 식(3)의 리질리언스 비용(OR)을 최소화시키는 RE(t)를 찾는 것으로, 모의를 통해 SP(t)를 지속적으로 계산할 필요가 있다. 이 때 SP(t)의 계산량이 크면 계산 소요 시간이 길어지거나 최적의 RE(t)를 계산하는 것이 불가능해 질 수 있다. 이에 SP(t)를 표현하기 위해 필요한 시스템의 차수(system order)를 줄이는 방법이 사용될 수 있는데, 차수감수모델(reduced-order models)이 하나의 대안으로 사용된다. 차수감수모델의 검증과 빨라진 계산 속도는 Camphouse 등(2008)에서 확인할 수 있다.

5. 리질리언스 연구 사례

미국에서는 2011년 미시시피 홍수로 인해 교통량이 많은 철도 교량이 물에 잠기는 사건이 발생하였다. 사건 발생 후 리질리언스 비용을 최소화하는 철도시스템 복구 순서를 수립해 보고자 하였으며, 이를 위해 교통량이 많은 4개의 교량(클린턴, 버링턴, 메디슨, 한니발)이 홍수로 물에 잠기고 3개의 교량(루이스 2개, 테베스)은 물에 잠기지 않아 기차가 정상적으로 운행될 수 있는 상황을 가정하였다(Fig. 4). 물에 잠긴 4개의 교량은 3개의 각기 다른 철도회사(Union Pacific Railroad(UP),



Source: Aamir (2011)

Fig. 4. 4 rail bridges on Mississippi River out due to flooding.

Table 2. Categories of System Impact

| Category | Unit Cost |
|-------------------------------|-----------------|
| Additional Car Miles (ACM) | \$1.50/car-mile |
| Additional Transit Time (ATT) | \$38/car-day |
| Carloads Not Moved (CNM) | \$1770/load |

Burlington Northern and Santa Fe Railway(BNSF), Norfolk Southern Railway(NS) 소유이다.

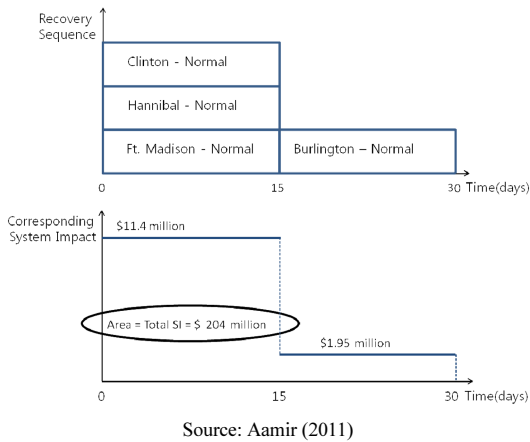
먼저 4개의 철도 교량이 물에 잠겨 발생하는 시스템 영향(SI)을 측정하였다. 교량이 물에 잠겨 철도가 정상적으로 운행되지 못하면 철도회사는 물론 많은 물류회사들이 경제적 손실을 입게 된다. 이에 Table 2과 같이 손해 요인과 그에 따른 단위 비용을 조사하고, 식(4)를 이용하여 시스템 영향을 계산하였다.

$$SI = \sum_i \left[1.5ACM + \frac{38}{24}ATT + 1770CNM \right] \quad (4)$$

여기서 추가운행거리(ACM), 추가운행시간(ATT) 및 운행되지 않는 차량수(CNM)의 규모는 R-NAS(Rail Network Analysis System)라는 모델로 평가하였다. NISAC에 의해 개발된 R-NAS는 운행거리가 최소인 철도 네트워크 흐름을 계산하는 비선형 최적화 모델로, 복구노력이 진행되면서 나타나는 철도 네트워크 흐름의 변화 및 이로 인한 시스템의 성능 변화를 평가할 수 있다(Vugrin et al., 2010a). R-NAS에 의하면, 복구 노력이 없을 경우, 4개의 교량이 물에 잠김으로 인해 하루에 1천1백4십만 달러의 손해가 발생한다. 차량 운행 정지(CNM)로 인한 손실이 가장 커 시스템 영향의 87%를 차지하였다.

Table 3. Recovery Mode

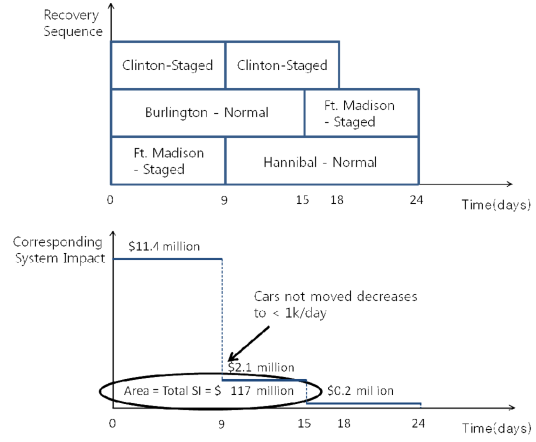
| Recovery Mode | Time to recovery (day) | Costs to Recover (\$M) | Capacity restored (%) | Resource Unit Cost |
|---------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| Normal | 15 | 5 | 100 | 1 |
| Emergency | 10 | 10 | 100 | 2 |
| Staged | 9 | 3 | 60 | 1 |



Source: Aamir (2011)

Fig. 5. Optimal recovery sequence without cooperation.

Table 3의 복구방법을 고려하여 리질리언스 비용을 최소화시키는 복구 순서를 찾아보았으며, 복구자원은 3개로 한정하였다. 정상복구(normal)는 복구비용은 적으나 복구시간이 길고, 비상복구(emergency)는 복구비용이 크고 복구 자원은 많이 소요되나 복구가 빠르다. 단계적 복구(staged)는 철로의 한쪽 방향이 먼저 복구되는 방법으로 적은 비용으로 빠르게 복구할 수 있으나 시스템의 60%만 정상화된다. 또한 복구전략으로 철도회사들끼리 협력하는 경우와 그렇지 않은 경우를 고려하였다. 철도회사들 간의 협력이란 다른 철도회사의 철로를 이용할 수 있는 경우로, 미국의 독점금지법(U.S. Antitrust Law)은 독점을 이유로 철도회사들간의 협력을 금지하고 있다. 그러나 대통령 행정명령(U.S. Executive Order)은 비상시 철도회사들간의 협력을 허용하고 있는데, 협력에 대한 사전 경험 부족으로 비상시 최적의 복구 전략을 수립하는데 어려움을 겪게 된다. 이에 다양한 복구순서가 존재하는 현실 상황을 고려하



Source: Aamir (2011)

Fig. 6. Optimal recovery sequence with cooperation.

여 리질리언스 연구가 수행되었으며, Figs. 5와 6의 결과를 얻었다.

Fig. 5는 철도회사간 협력이 없는 경우로 클린턴, 한니발, 메디슨 다리를 먼저 정상복구방법으로 복구한 후 벌링턴 다리를 정상복구방법으로 복구하는 것이 리질리언스 비용을 최소화하였다. 네 개의 다리를 동시에 복구하지 못하는 것은 복구 자원이 3개로 제한되었기 때문으로, 정상복구방법에 소요되는 자원은 교량 당 1개이다(Table 3). 이로 인한 시스템의 영향은 총 2억 4백만 달러이며, 복구 시간은 30일이다. 반면 Fig. 6은 철도회사간 협력이 있는 경우로, 클린턴과 메디슨은 단계적 복구 방법으로, 벌링턴은 정상복구방법으로 복구를 시작하고, 후에 한니발을 정상복구방법으로 복구하면서 클린턴과 메디슨을 단계적 방법으로 복구를 마치는 것이 최적의 복구 순서임을 보여주고 있다. 이 경우 총 시스템 영향은 1억1천7백만 달러로 Fig. 5보다

Table 4. Comparison of two strategies

| | Days to complete recovery (day) | Systemic Impact (\$M) | Total Recovery Effort (\$M) | Resilience Cost (\$M) |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Cooperative approach | 24 | 117 | 22 | 139 |
| Non-cooperative approach | 30 | 204 | 20 | 224 |

적으며, 복구 기간도 24일로 Fig. 5의 경우보다 단축되었다. 이러한 결과는 철도회시간 협력으로 운행정지차량이 급격히 줄었기 때문이다. Fig. 6의 경우, 복구 시작 9일 후 일일 운행정지차량이 1천대 이하로 줄었다. Table 4는 철도회시간의 협력이 최적의 복구전략 수립에 미치는 영향을 정리하고 있다. 본 연구 사례는 손실비용 자료(Table 2)와 모형(R-NAS)을 통해 리질리언스 비용이 측정되고 최적화될 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결 언

미국의 국토안보부는 국가기반시설의 물리적 보호만으로는 재난으로 인한 기반시설 시스템의 성능 피해를 막을 수 없음을 인식하고 국가기반시설보호계획에 리질리언스 개념을 통합하기 시작하였다. “리질리언스” 개념을 국가기반시설보호에 활용하기 위해서는 리질리언스의 정의 및 측정 방법에 관한 논의가 필요했고, 이에 샌디아국립연구소에 리질리언스 평가 연구를 의뢰하였다. 샌디아국립연구소는 복구노력을 포함하여 리질리언스를 재정의하였고, 리질리언스 정량화를 위해 리질리언스 비용을 고안하였다. 샌디아국립연구소의 리질리언스 비용은 위협요인에 의한 시스템의 성능 저하와 시스템 성능 복구를 위해 투입되는 복구 노력을 합한 것으로, 리질리언스 평가 사례는 리질리언스 평가 시 복구노력을 고려할 필요가 있고, 리질리언스 비용 연구를 통해 리질리언스 비용은 줄이고 복구 시간은 단축시킬 수 있는 기반시설 시스템이 구축될 수 있음을 보여주고 있다.

국내 국가기반시설도 매년 재난으로 인해 큰 피해를 입고 있으며, 이에 국가 지속성을 위해 기반시설 리질리언스에 관한 연구가 필요로 되고 있다. 본 논문에 소개된 리질리언스 비용 연구가 국내 기반시설의 리질리언스를 확보하는데 있어 좋은 사례가 될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 2011년 9월 19일 국가수리과학연구소에서 진행된 초청강연 “Critical Infrastructure Resilience”

내용을 바탕으로 작성되었습니다. 초청강연에 응해 주신 미국 샌디아국립연구소의 이무열 박사, Chris Camphouse 박사, Munaf Aamir에게 감사의 말씀을 드립니다. 특히 본 논문의 내용을 검토해주신 샌디아국립연구소의 이무열 박사님께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Aamir, M.S. (2011) Value of Resilience from Critical Infrastructure Perspective. Invited talks on Critical Infrastructure Resilience, September, 19, 2011, Daejeon, Korea.
- Camphouse, R.C., Myatt, J. H., Schmit, R. F., Glauser, M.N., Ausseur, J.M., Andino, M.Y. and Wallace, R.D. (2008) A snapshot decomposition method for reduced order modeling and boundary feedback control, AIAA paper 2008-4195, June 2008.
- DHS (Department of Homeland Security) (2009) National Infrastructure Protection Plan –partnering to enhance protection and resilience: URL: http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/NIPP_Plan.pdf
- NIDP (National Institute for Disaster Prevention) (2010) Development of the Indicators and Checklists for Diagnosis of the Urban Resilience. 11-1660080-000063-01.
- Vugrin, E.D. and Camphouse, R.C. (2011) Infrastructure resilience assessment through control design. International journal of critical infrastructure, v.7, n.3, p.243-260.
- Vugrin, E.D., Turnquist, M.A. and Brown, N.J.K. (2010a) Optimal recovery sequencing for critical infrastructure resilience assessment. Sandia report, SAND2010-6237.
- Vugrin, E.D., Warren, D.E. and Ehlen, M.A. (2011) A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane. Process Safety Progress, v.30, n.3, p.280-290.
- Vugrin, E.D., Warren, D.E., Ehlen, M.A. and Camphouse, R.C. (2010b) A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. In Gopalakrishnan, K. and Peeta, S. (ed.) Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems: Simulation, Modeling, and Intelligent Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.77-116.
- Yoo, J.K. (2009) Enterprise Risk Management through Resilience. Economic Review, v.49, p.37.

2011년 12월 1일 원고접수, 2011년 12월 21일 게재승인