사이클론에 대한 피지의 방재력 정량화 연구

Quantitative Resilience Analysis of Fiji to Cyclones

유순영* · 김성욱** · 박경호*** · 오창환**** · 박덕근***** · 김창용*****

Yu, Soonyoung · Kim, Sung Wook · Park, Kyung-Ho · Oh, Chang Whan · Park, Dug Keun · Kim, Chang Yong

Abstract

Resilience Cost is applied to quantitatively assess the resilience and the vulnerability of Fiji to tropical cyclones (TCs), based on historical damage data. The resilience cost, which was developed by the US Department of Homeland Security to protect critical infrastructures, is the sum of the system impact and the total recovery effort. The higher resilience cost indicates that the system is less resilient. Study results show that the resilience of Fiji to TCs depends on the strength and the path of a TC as well as inventory in affected areas. In particular, the northern division whose economy is based on commercial agriculture of sugar cane is vulnerable to TCs due to the frequency of TCs as well as the vulnerability of agriculture to TCs. This study result demonstrates that the resilience cost is a good indicator to determine a location to give priority to for resilience enhancement or recovery resources and can be used to assess causes of vulnerability. In addition, the resilience cost may be used to determine optimal recovery strategies if integrated with a modeling, simulation, and analysis program given scenario analysis capabilities.

Key words : Resilience cost, System impact, Recovery effort, Priority, Causes of vulnerability

요 지

피지의 사이클론 피해 보고서를 바탕으로 사이클론에 대한 피지의 방재력을 정량적으로 측정하고 취약성을 분석해 보고자 리질리언스 비용을 활용하였다. 미국 국토안보부가 국가기반시설 리질리언스 확보 연구를 위해 고안한 리질리언스 비용은 시스템 영향과 복구노력의 합으로, 상대적 수치 비교를 통해 시나리오 간의 리질리언스를 정량적으로 비교한다. 연구 결과, 사이클론에 대한 피지의 방재력은 사이클론의 카테고리, 이동 경로, 피지 도달 시점에서의 카테고리 및 피해지역의 인구분포와 자산 등에 영향을 받으며, 특히 상업적 농업 활동의 비중이 큰 북부지역이 사이클론에 취약함을 알 수 있었다. 이는 사이클론이 북서부지역에서 주로 발생하고, 농업활동이 사이클론에 크게 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 본 연구의 연구 결과는 리질리언스 비용이 다양한 이해관계 속에서 긴급 지원이 필요한 곳에 우선순위를 지정하고, 취약 원인을 분석하는데 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다. 또한 모의 기술을 통한 시나리오 평가 연구가 함께 수행될 경우, 리질리언스 비용은 최적의 복구 전략을 수립하는데도 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 리질리언스 비용, 시스템영향, 복구노력, 우선순위, 취약 원인

1. 서 론

국가 안보를 위해 재난 연구에도 리질리언스(resilience) 개념이 도입되기 시작하였다(Klein 등, 2003 Vulgrin 등, 2010). 여기서 리질리언스는 개념 자체의 복잡성으로 인해 여러 분야에서 사용자마다 각기 달리 정의하여 사용하는 용어로, 재난 관리의 경우, 시스템이 흡수할 수 있는 소요(disturbance)의 크기 및 스스로 재조직(self-organization) 할 수 있는 능

력의 크기를 나타내는 시스템의 특성으로 사용되도록 권고된 바 있다(Klein 등, 2003). 여기서 시스템이란 규모에 따라 국가, 도시, 마을이 될 수 있으며, 목적물에 따라 교통, 물자, 전력, 수자원, 에너지 공급 시스템 등일 수 있다. 시스템의 리질리언스는 생태학자 Holling(1973)이 처음 정의한 것으로 알려지고 있으며, 그의 정의에 따르면 리질리언스는 시스템의 지속 능력 및 외부 변화를 흡수하여 현 상태를 유지하는 능력이다. Holling(1973) 이후 많은 사람들이 유사하게 리질리

*정회원 · 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 연구원(E-mail : s7yu@nims.re.kr)

**지아이 지반정보연구소 대표

*** (주)본이앤씨

**** 전북대학교 지구환경과학과 교수

*****정회원 · 국립방재연구원 지반방재연구팀 시설연구관

*****정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라 연구실 연구위원(교신저자)

언스를 정의하고 있으며, 공통적으로 외부력에 의한 변화 압력에 저항하는 능력의 의미를 담고 있다(Vugrin 등, 2010).

방재선진국 미국은 재난으로부터 국가기반시설을 보호하기 위해 국가기반시설보호(Critical Infrastructure Protection, CIP)에 리질리언스 개념을 통합하기 시작하였다. 이는 기반시설의 물리적인 보강만으로는 국가 안보를 실현할 수 없기 때문으로, 재난 시에도 주요한 시설물의 기본 기능이 유지될 수 있는 국가 시스템을 만들기 위해서이다. 미국 국토안보부 주도하에 연구되는 국가기반시설 리질리언스(Critical Infrastructure Resilience, CIR)는 Vugrin 등(2010)에 의해 “특정 사건 발생시 시스템의 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 정의되어 사용되고 있다. Vugrin 등(2010)의 리질리언스 연구 목적은 재난 이전 기반시설의 리질리언스를 강화하고 재난 직후 빠르고 효율적인 최적의 복구 대책을 수립하고자 하는 것으로, 특히 기존의 리질리언스 연구와 달리 복구 노력의 중요성을 강조하고 있다.

국내에서도 리질리언스란 용어가 회복력(2010년 ICLEI 세계환경회의), 방재력(국립방재교육연구원, 2010) 등으로 번역되어 재난 연구에 사용된 바 있다. 특히 국립방재교육연구원(2010)은 도시 방재력을 번역하기 위해 리질리언스라는 용어를 사용하였는데, 이는 기존에 널리 번역되던 disaster prevention 또는 disaster reduction과는 다른 개념으로, 국내에서도 리질리언스 연구가 시작되는 계기가 되었다고 할 수 있다. 본 논문에서는 리질리언스를 Vugrin 등(2010)의 리질리언스와 같이 정의하고, 필요에 따라 방재력으로 번역하였다.

본 논문은 Vugrin 등(2010)의 리질리언스 비용(resilience cost) 방법을 통해 피지의 방재력을 평가하고자 한다. 이러한 분석 과정은 “리질리언스 비용”이 국내에서 지역방재력을 비교하고 취약성을 분석하는데 있어 지수로 사용될 수 있음을 검토하고자 함이다. 국내의 경우, 방재력 평가에 관한 연구는 일부 찾아볼 수 있으나(김경남, 2008; 국립방재교육연구원, 2010), 방재력을 정량화하여 비교 분석할 수 있는 기법에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 방재력은 다면적 속성으로 인해 정의하기 쉽지 않고, 측량은 더더욱 어려운 개념이나, 산재한 국가 현안들 사이에서 시급성을 판단하기 위한 지수로써 정량화될 필요가 큰 개념이기도 하다.

2. 연구방법

많은 사람들이 시스템의 회복력, 복구력을 연구하기 위해 리질리언스 개념을 사용하고 있으나, 리질리언스를 정량적으로 평가한 연구는 Bruneau 등(2003), Chang 등(2004), Rose(2007), Vugrin 등(2010)과 같이 극히 소수에 불과하다. Vugrin 등(2011)은 이들 방법들을 비교하고, Vugrin 등(2010)에 의해 개발된 리질리언스 비용의 우수성을 검증한 바 있다. 이에 본 연구는 Vugrin 등(2010)의 리질리언스 비용 방법을 활용하여 피지의 국가 방재력을 측정해 보고자 한다.

리질리언스 비용은 시스템 영향(System Impact, SI)과 총 복구노력(Total Recovery Effort, TRE)의 합으로, 리질리언스

그림 1. 리질리언스 비용(Vulgrin 등, 2010)

비용이 크면 시스템 영향이 크거나 총 복구노력이 많이 소요되어 시스템의 리질리언스가 좋지 않은 것으로 해석한다. 또한 동일 재난과 동일 시스템의 리질리언스 비용을 측정하더라도, 시스템영향 및 총 복구노력을 평가하는 방법에 따라 리질리언스 비용이 달라질 수 있으므로, 절대적인 수치보다는 상대적인 비교를 통해 의미를 갖게 된다. 특히 리질리언스 비용은 기존의 연구 방법과 달리 리질리언스 평가에 있어 시스템 영향뿐만 아니라 복구 노력도 중요함을 강조하고 있다. 즉 그림 1에서 시스템영향만 보면 시스템 1과 시스템 2의 리질리언스는 동일하다. 그러나 시스템 1에 투입된 복구노력이 더 크다고 고려한다면, 시스템 2가 더 리질리언스가 확보된 시스템이라 할 수 있다. 또한 동일한 사건에 대해 특정 시스템의 영향 및 복구 시간은 복구 노력 방법에 따라 달라질 수 있다. 이에 Vugrin 등(2010)은 리질리언스 비용을 특정 복구활동에 의한 리질리언스(Recovery Dependent Resilience, RDR) 비용과 최적의 리질리언스(Optimal Resilience, OR) 비용으로 구분하여 각각 계산하였다.

본 연구논문은 허리케인 아이크(Ike) 직후 화학제품 공급망의 리질리언스 비용을 평가한 Warren 등(2010)과 같이, 기존의 재해 사례를 통해 시스템영향과 복구노력을 평가하고, 리질리언스 비용을 계산하고자 하였다. 이미 발생한 사건을 대상으로 리질리언스 연구를 수행할 경우, 실제 자료가 사용됨으로 리질리언스 해석 결과의 검증이 가능하다. 또한 유사 사건에 대비하여 리질리언스 확보책을 강구하는데 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 기 발생된 사건의 리질리언스를 평가하기 위해서는 시스템영향과 복구노력을 측정할 수 있는 적절한 자료가 필요한데 이를 구하는 것이 쉽지 않다. 실제 리질리언스 비용을 고안한 미국 국토안보부의 경우도, 자료 부족 문제로 현재 민관이 함께 자료 구축을 활발히 수행 중이다. 또한 자료 부족 등의 이유로 모의 기술을 리질리언스 비용 평가에 크게 활용하고 있다(Vulgrin 등, 2010, Vugrin 등, 2011, 유순영, 2011). 모의 기술의 시나리오 평가 기능은 복구 시나리오에 따른 리질리언스 비용 차이를 평가하고 최적의 복구 방법을 결정하는데 활용될 수 있다. 또한 복구 과정에서 시스템의 영향이 변화하는 과정도 모의할 수 있으므로, 이에 따른 최적의 복구 전략을 실시간으로 결정하는데도 도움을 줄 수 있다.

3. 연구지역 피지

2010년 제4차 UN 재해경감 아시아 각료회의에서 채택된 행동계획(Action plan)의 완성도 높은 수행을 위해, 재해 취약국들을 대상으로 하는 국제연구사업을 검토하고 미흡한 부분을 보완하기 위한 신규 사업이 기획될 필요가 있다. 특히 피지를 포함한 남태평양 지역의 도서국들은 열대성 사이클론의 피해에 매우 취약하나 지리적 고립성, 소규모 인구, 낙후된 기반 시설 등으로 인해 자연재해관리체계가 미흡한 실정이다. 이에 본 논문에서는 사이클론에 대한 피해 조사가 비교적 잘 이루어지고 있는 피지를 선택하여, 사이클론의 취약 원인을 분석하고 방재력 강화가 시급한 지역을 찾아보고자 리질리언스 비용을 적용하여 보았으며, 향후 본 연구 방법이 재해취약국은 물론 국내 방재 전략 수립에 도움이 될 수 있을지 알아보고자 하였다.

피지는 남태평양 서부 멜라네시아의 남동부에 있는 국가로, 행정구역상 중부, 동부, 서부, 북부의 4개 지역으로 구분되어 관리되고 있다(표 1). 연중 부드러운 남동무역풍의 영향으로 극단적으로 비가 많이 오지는 않으나, 여름철 우기(11월-4월)에는 열대성 사이클론의 영향을 받기도 한다(그림 2). 1월과 2월에 가장 빈번하게 발생하는 열대성 사이클론은 평균적으로 10년에 10~15개가 피지에 영향을 미치고 있으며, 이 중 2~4개는 치명적인 피해를 입히고 있다(FMS, 2012). 특정 지역이 수년 동안 연속적으로 직접 피해를 입은 적은 없으나, 사이클론이 대개 북서쪽에서 발생하여 남동쪽으로 이동함을

표 1. 피지의 지역 구분(Fiji Islands Bureau of Statistics, 2007)

구분	중부	동부	서부	북부	피지
수도	Suva	Levuka	Lautoka	Labasa	Suva
면적(km ²)	4,293	1,422	6,360	6,199	18,272
인구	342,386	39,313	319,611	135,961	837,271

표 3. 호주의 열대성 사이클론 강도 등급 (Australian tropical cyclone intensity scale)

이름	카테고리	10분 평균 풍속 (sustained winds)	돌풍(gusts)
Severe tropical cyclone	5	>200 km/h	>279 km/h
Severe tropical cyclone	4	160-200 km/h	225-279 km/h
Severe tropical Cyclone	3	118-159 km/h	165-224 km/h
Tropical cyclone	2	89-117 km/h	125-164 km/h
Tropical cyclone	1	63-88 km/h	91-125 km/h
Tropical Low	-	<63 km/h	91 km/h

고려할 북서쪽 섬들이 높은 피해 위험에 놓였다고 할 수 있다(FMS, 2012). 특히 최근에는 지구온난화, 산림벌채, 인구증가 및 무분별한 도시계획 등으로 사이클론의 피해가 잦아지고 있으며, 사이클론 이외에도 열대 저압부(tropical depression)와 저압계(low pressure system)가 돌발 홍수의 원인이 되고 있다.

피지는 자연재해관리법(Natural Disaster Management Act, 1997)에 의해 조성된 재해복구기금(National Disaster Relief and Rehabilitation Fund)에도 불구하고 경제규모에 비해 큰 사이클론 피해가 매년 반복되고 있어, 복구 비용을 선진국 및 국제기구로부터 원조받고 있다(표 2). 피해지역의 복구비를 해외로부터 조달받기 위해 재난 직후 피해 상황을 비교적 잘 정리하고 있으며, 피해 내역뿐만 아니라, 비상대응결과, 원조상황, 복구계획 및 향후대책 등을 보고하고 있다. 본 논문은 표 2의 사이클론 피해 사례 보고서를 바탕으로 피해비용 및 복구비용을 검토하고, 리질리언스 비용을 측량한 후, 방재력이 취약한 지역을 평가하고 취약 원인을 분석하고자 한다. 표 2의 카테고리는 호주의 열대성 사이클론 강도 등급으로, 표 3과 같이 분류된다.

그림 2. 2002-03년 남태평양 지역에서 발생한 폭풍(Wikipedia, 2012)

표 2. 피지의 사이클론 피해 사례 (단위: 피지달러)

열대저기압(TC)	영향기간	카테고리	피해액	복구비 추정액	해외조달 (현금지원, 물품지원제외)
Ami	2003.1.12-15	3	104,387,789	24,492,142	2,553,000
Cliff	2007.4.4-6	2	6,192,890	1,524,174	-
Daman	2007.12.5-9	4	500,252	534,867	-
Gene	2008.1.28	3	51,405,947	51,405,947	-
MICK	2009.12.13-16	1	59,356,480	11,505,168	77,250
Tomas	2010.3.12-16	4	84,326,800	11,505,168	685,000

4. 리질리언스 분석 결과

표 2의 사이클론 피해 자료를 참고하여 식 (1)과 같이 특정 복구노력(RE)에 의한 리질리언스 비용(RDR)을 측정하였다.

$$RDR(RE) = \int_{t_0}^{t_f} |TSP(t) - SP(t)| dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} |RE(t)| dt \quad (1)$$

여기서 t_0 는 재난 발생 시점, t_f 는 복구 완료 시점이고, TSP는 시스템 성능의 목표치로 재난 전후가 다를 수 있다. SP는 시스템의 현재 성능으로, $|TSP(t) - SP(t)|$ 는 시스템 영향을 표현한다. α 는 가중치 부여 및 단위 환산을 위한 계수이다. 4.1절에서는 가장 최근 발생한 사이클론(TC-Tomas와 TC-MICK) 피해 사례의 리질리언스 비용을 비교하며, 4.2절에서는 카테고리 같은 사이클론(TC-Ami와 TC-Gene) 피해 사례의 리질리언스 비용을 비교 분석한다. 4.3절에서는 리질리언스 비용이 복구 시나리오 연구에 활용될 수 있음을 보이고자 하며, 4.4절에서는 지역 방재력 비교 평가에도 활용될 수 있음을 보이고자 한다.

Vugrin 등(2010)은 식 (1)을 시스템 성능의 목표치(TSP)로 나누어 규모가 다른 시스템 간의 비교가 가능하도록 하고 있다. 그러나 본 논문은 피지라는 동일 국가를 대상으로 리질리언스 비용을 평가하므로 TSP는 동일하다고 가정, 리질리언스 비용 계산에 고려하지 않았다. 또한 4.4절에서는 피지 내 지역 방재력을 비교하였는데, 이 경우에는 정보부족으로 TSP를 고려하지 않았다. 본 논문에서 참조한 보고서의 내용은 일부 최종 평가 결과가 아니므로, 실제 리질리언스 비용은 본 연구의 결과와 다를 수 있음을 밝힌다. 또한 보고서에서 발견된 오타의 경우, 문맥을 활용하여 저자가 피지 재난관리청(National Disaster Management Office)의 허가 없이 임의로 보정하여 사용하였다.

4.1. 사이클론 MICK와 사이클론 TOMAS

가장 최근 발생한 두 사이클론의 피해 사례를 비교하여(표 4), 피지의 현 국가 방재력 수준을 정량화하였다(NDMO, 2010a; NDMO, 2010b). 두 사이클론의 피해 보고서는 비슷한 양식으로 작성되어 있어 비교가 용이하였다. 표 4에서 대피소(대피인원) 정보는 최대 대피 인원 기록일, 2009년 12월 18일(TC-MICK)과 2010년 3월 16일(TC-TOMAS)을 각각 기준으로 하였으며, TC-MICK의 해외지원금은 주요 지원국 비용만 포함하였다. 표 4는 TC-TOMAS가 TC-MICK보다 더 큰 피해를 입었음을 보여주고 있다. 이는 TC-TOMAS의 카테고리가 더 컸기 때문으로 추정된다. TC-TOMAS는 피지의 자연재해관리법에 따라 국가재난으로 선포되었으며, 북부 Lau와 동부 Lomaiviti에서는 30일간 비상구조활동이 진행된 바 있다. TC-MICK의 경우, 국가재난으로 선포되지는 않았으나 비상운영체제가 가동되고 긴급구조물자가 공급되었으며, 특히 TC-TOMAS보다 더 많은 사상자를 발생시켰다. 이는 TC-MICK가 인구가 많이 분포하는 서부와 중부를 중심으로 영향을 미쳤기 때문으로 보인다(표 1 참조).

TC-TOMAS와 TC-MICK로 인한 피지의 리질리언스 비용

표 4. 사이클론 MICK와 TOMAS 비교

사이클론 (Tropical Cyclone)	TC-MICK	TC-TOMAS
카테고리	1	4
영향기간	2009년 12월 13일-16일	2010년 3월 12일 - 16일
피해지역	서부, 중부, 동부	북부, 동부, 중부
피해형태	홍수, 강풍, 산사태	홍수, 폭풍 해일, 산사태
국가재난선포	없음	북부 Lau, 동부 Lomaiviti
대피소(대피인원)	71개소 (3,233명)	5,099개소 (10,309명)
사망자	3명 (서부 2명, 중부 1명)	1명 (북부)
비상구조물자 조달비용	74,986.72	489,626.00
해외지원(현금지원)	77,250	685,000
피해총액	59,356,480.18	84,326,800.49
복구비용	11,505,167.84	11,505,167.84
구조물자조달기간	1개월	3개월

그림 3. 대피인원과 피해액 간의 관계(최대 대피인원 기록일 기준)

을 측정하기 위해서는 그림 1과 같이 시스템 영향과 복구노력을 평가하여야 한다. 본 연구는 대피인원과 피해액이 상관관계를 보이지 않음을 고려하여(그림 3), 피해총액과 대피인원수를 합하여 시스템 영향을 평가하였다. 일반적으로 대피인원은 경제활동 및 사회활동에 영향을 미쳐 국가 및 지역의 정상적인 운영을 방해하므로 대피인원수를 통해 피해액에 포함되지 않은 시스템 영향을 간접적으로 측정할 수 있을 것으로 보인다. 그림 4는 사이클론 직후 대피 인원수의 시계열 자료, 즉 피해액에 포함되지 않은 시스템 영향을 보여주고 있다. 그림 4에서 TC-MICK와 TC-TOMAS는 y축에 다른 규모의 대피인원 값을 가지고 있다. 대피인원의 수를 경제규모로 환산하기 위해서는 시간당 최저임금 F\$ 1.25와 일일 근무시간 8 hr를 사용하였다.

복구노력(TRE)의 경우, 동일한 복구 시스템(RE)이 운영되는 것을 가정하여, 동일한 복구비용을 예상하였다(표 4). 그러나 TC-TOMAS의 경우 구조물자조달기간이 더 길 것으로 추정된 바 있으며(표 4), 이에 복구비용과 구조물자조달기간을 함께 고려하면 TC-TOMAS에 더 큰 복구노력(시간 및 비용)이 소요될 것으로 보인다. 구조물자조달비용은 TC-TOMAS의 경우 북부지역은 월 35,324.66달러, 동부지역의

그림 4. 시스템 영향 중 대피인원 부분

표 5. 리질리언스 비용 (단위: 피지달러)

사이클론 (Tropical Cyclone)	TC- MICK	TC- TOMAS
시스템 영향	59,412,170.18	84,732,380.49
피해총액	59,356,480.18	84,326,800.49
대피	55,690.00	405,580.00
충복구노력	11,607,567.85	12,250,928.24
복구비용	11,505,167.84	11,505,167.84
비상구조물자 조달비용	102,400.01	745,760.40
리질리언스 비용	71,019,738.03	96,983,308.73

경우 월 213,262.14달러로 예상된 값을 사용하였으며(NDMO, 2010b), TC-MICK의 경우, 보고된 값이 없어, 대피인원 규모를 활용하여 TC-TOMAS의 값(745,760.4 달러/40,558명)을 TC-MICK의 값(5,569명)으로 환산하여 월 102,400 달러를 사용하였다.

위에 언급한 시스템 영향 및 복구노력을 바탕으로 계산된 리질리언스 비용은 표 5와 같다. 피지는 TC-TOMAS에 더 취약했으며, 이는 카테고리가 큰 TC-TOMAS에 의해 시스템(피지)이 더 많은 영향을 받았기 때문이다. 비록 표 5의 리질리언스 비용 계산으로 표 4만으로도 해석할 수 있었던 결과와 다른 새로운 사실을 발견할 수는 없었으나, 시스템 영향 분석에 사망자를 고려할 경우, 사망자에 부과되는 가중치에 따라 시스템 영향이 크게 달라질 수 있으며, 이에 표 5와 달리, 카테고리가 약한 사이클론이 인구가 많은 지역에 강타하여 더 큰 피해를 준 사례라는 해석 결과도 얻을 수 있을 것이다.

4.2. 사이클론 Ami와 사이클론 Gene

카테고리가 같은 사이클론에 대한 피지의 리질리언스를 비교하기 위해 사이클론 Ami와 사이클론 Gene을 비교하였다(NDMO, 2003; National Taskforce Cyclone Gene, 2008). TC-Gen의 경우, 피해액이 곧 복구비용으로 보고되어 있어 이를 그대로 표 6에 반영하였으며, 구조물자조달비용에 관한 정보 부족으로 리질리언스 비용은 피해총액과 복구비용의 합으로만 표현하였다. 인구가 많은 서부와 중부에 큰 영향을 미친 TC-Gen은 더 많은 대피인원을 발생시켰으며, 이에 리질리언스 비용 계산에 구조물자조달비용을 고려할 경우, TC-Gen의 복구노력비용(곧 리질리언스 비용)은 TC-Ami의 비용

보다 더 커 질 수 있다. 한편 리질리언스 비용 계산에 사망자의 수를 고려하면, TC-Ami의 시스템 영향(곧 리질리언스 비용)이 더 커져 반대 현상이 일어날 수 있다.

표 6은 TC-Ami의 리질리언스 비용이 TC-Gen의 리질리언스 비용보다 더 커, 피지는 TC-Ami에 더 취약했음을 보여준다. TC-Ami의 리질리언스 비용이 더 큰 이유는 피해총액(즉 시스템 영향)이 컸기 때문이다. 같은 카테고리의 사이클론임에도 불구하고, TC-Ami가 더 큰 경제적 피해를 입혔으며, 더 많은 사망자를 낳았다. 이는 2003년 이후 피지의 방재력이 증가했기 때문으로 보인다. 피지는 2002-03년 사이클론 시즌부터 인쇄물과 라디오 방송 등을 통해 강풍(Gale Warning)-폭풍(Storm Warning)-허리케인(Hurricane Warning) 등으로 사이클론을 예경보하기 시작하였다. 예경보 수준에 따라 국가비상운영센터(National Emergency Operation Centre), 지역운영센터(Divisional and District Operations Centres)가 가동되고, 재난관리위원회운영센터(Disaster Management Committee (DISMAC) Operation Centers)는 피난처 운영 및 대피, 구조, 구조물자공급 등을 모니터링하며, 지역담당자(Divisional Commissioners)들은 현장 피해 조사를 실시한다.

표 6. 사이클론 Ami와 사이클론 Gene 비교

사이클론 (Tropical Cyclone)	TC - Ami	TC - Gene
카테고리	3	3
영향기간	2003년 1월 12일-15일	2008년 1월 28일
피해지역	북부, 동부	서부, 동부, 중부
피해형태	강풍, 폭우, 홍수	홍수, 산사태
국가재난선포	북부와 동부 전 지역	홍수 피해 지역
대피소(대피인원)	16개소 (292명과 18가구)	48개소 (1452명)
사망자	19명 (북부14, 동부1, 실종4)	6명
비상구조물자 조달비용	5,240,550.46	-
해외지원(현금지원)	2,553,000	-
피해총액	104,387,789	51,405,947.18
복구비용	24,492,142	51,405,947.18
구조물자조달기간	3 개월	3 개월
리질리언스 비용	128,879,931	102,811,894

또한 피지는 경험을 통해 지구온난화로 인해 찾아지는 사이클론에 조금씩 방재력을 확보하고 있는 것으로 보인다.

4.3. 사이클론 DAMAN

복구 시나리오에 따른 리질리언스 비용을 평가하기 위해 TC-DAMAN 자료를 분석하였다(NDMO, 2007b). 카테고리 4의 TC-DAMAN은 2007년 12월, 피지 북부지역 Chkobia 섬에 큰 영향을 미쳤다. Chkobia는 인구 119명의 섬으로 4개 마을(Nalele, Vuninuku, Vatulele, Nautovatu)로 이루어져 있는데, 사이클론 DAMAN은 특히 Nalele과 Vuninuku에 큰 피해를 입혔으며, 총피해 규모는 500,252 피지 달러로 추정된다(표 7). 표 7의 총피해액은 같은 카테고리의 TC-TOMAS보다 매우 작다(표 4). 이는 TC-DAMAN이 Chkobia 섬 도달 전에 최고 카테고리를 보였고, 섬에 도착할 무렵부터 카테고리 4가 약해졌기 때문이다. 즉 피해액은 사이클론의 카테고리 4와 함께, 사이클론의 이동 경로, 피해지역의 인구분포 및 자산, 피해지역 도달 시점에서의 사이클론 카테고리 등에 영향을 받는다.

NDMO(2007b)의 DAMAN 피해 보고서는 완파된 가구에 대한 복구 시나리오를 표 8과 같이 제안하였으며, 이를 이용하면 복구 시나리오 따른 리질리언스 비용의 차이를 보여 줄 수 있다. 표 8의 모든 복구 시나리오는 피지 전원지역의 일반적인 주거 형태인 24×16 ft 목재 구조물의 신축을 가정하였으며, 보고서 작성 당시 24×16 ft 목재 구조물의 재료비는 10,448 피지달러, 인건비는 4,897 피지달러로 평가되었다. TC-DAMAN으로 완파된 가구는 18개소, 부분 파손된 가구는

9개소였으며, 이에 시나리오당 표 8의 총액에 해당하는 비용이 가구 복구비용으로 계산되었다. 부분 파손된 집의 경우 실제 피해액을 보조받으나, 1,500불을 넘을 수 없으며, 이러한 조건이 표 8의 계산에 활용되었다. 주택 복구비 이외에 소요되는 기타 비용, 즉 위생보건, 농업 등을 복구하는데 소요되는 비용은 주택 복구 시나리오에 관계없이 일정(245,155 피지달러)하다고 가정하였다.

총피해액은 표 7과 같이 일정하고, 주택 복구 시나리오에 따른 주택 복구 비용이 표 8과 같이 다를 수 있음을 고려하면, 표 9의 리질리언스 비용을 얻을 수 있다. 표 9에서 시나리오 2와 시나리오 3의 경우, 복구비용은 표 8의 주택복구비용과 기타복구비용(245,155 피지달러)의 합과 같으나, 새집 완공까지의 복구 시간이 오래 걸릴 수 있고, 새 집 완공이 보장되지 않음을 고려하여, 비상구호활동 기간을 각각 3개월과 6개월로 가정하였다. TC-DAMAN에 실제 사용된 비상구호활동비 30,628 피지달러를 월 비상구호활동비용으로 가정하고(NDMO, 2007b) 리질리언스 비용을 계산한 결과, 표 9는 큰 복구비용에도 불구하고 시나리오 1이 가장 효율적인 복구 시나리오임을 보여주고 있다. TC-DAMAM은 사이클론 시즌 중간인 12월에 발생하였으며, 이에 자연재해에 취약한 집이 만들어지거나, 복구시간이 길어지면, 또 다른 사이클론의 피해를 입을 수 있다. 이에 새 집 완공까지의 시간과 완공 직후 또는 완공 전에 사이클론이 발생할 경우 생길 수 있는 현상 및 이로 인한 피해 규모를 고려하는 방법에 따라 표 9의 리질리언스 비용은 달라질 수 있다.

4.4. 2007년 재난과 지역 방재력

2007년 재난 피해 보고 내역(NDMO, 2007a)을 바탕으로 피지의 지역 방재력을 비교하고, 취약원인을 분석하였다. 4.3절에 언급한 TC-DAMAN은 NDMO(2007b)에 독립적으로 보고되어 있어, 표 10의 분석에서 제외하였으나, 필요에 따라 표 10의 북부지역 자료에 포함시킬 수 있다. 표 10에서 리질리언스 비용은 피해액과 복구노력의 합으로, 2007년 재해 결과를 지역별로 구분하여 정리하고 있다. 표 10의 리질리언스 비용은 피지의 북부지역이 2007년 재난에 가장 취약했음을 보여준다. 표 9의 시나리오 1 비용이 포함할 경우, 북부지역의 리질리언스 비용은 8,815,683 피지달러로 취약도는

표 7. 피해액 (단위: 피지달러)

분 류	내 용	피해액
주택	완파 18개소; 부분파손 9개소	213,443.10
공공건물	교회, 문화회관, 협동조합 등	24,042.25
학교	교실, 교무실 파손	149,195.60
수자원공급시스템	상수도관 파손, 물탱크 오염	8,000.00
위생보건	피해 적음	900.00
농업	근채작물과 야채 피해	104,671.00
총 액	-	500,251.95

표 8. 주택 복구 시나리오 (단위: 피지달러)

시나리오	내용	단위비용	총액	복구 형태
1	새 집 제공	15,345	289,712	자연재해에 강한 새 주거지 완공
2	재료비 원조	10,448	201,562	새 집 완공 보장 안됨. 자연재해에 취약할 수 있음.
3	재료비의 1/2 원조	5,224	107,532	소유자는 해비타트(Habitat for Humanity)와 같은 기관에 지원 신청할 수 있음. 새 집 완공 어려움.

표 9. 리질리언스 비용

시나리오	시스템 영향	복구비용	비상구호활동비	리질리언스 비용
시나리오 1	500,251.95	534,867.02	0	1,035,118.97
시나리오 2	500,251.95	446,717.42	91,884.24	1,038,853.61
시나리오 3	500,251.95	352,687.22	183,768.48	1,036,707.65

표 10. 2007년 지역 방재력 비교

피해지역	서부		북부		동부
재난	홍수(2월)	홍수(3월)	돌발홍수	TC- Cliff	
영향기간	2월 9일-12일	3월 24일-25일	3월 9일-11일	4월 4일-6일	
피해액(시스템영향)	2,985,989	631,827	63,500	6,192,890	-
복구노력	2,626,234		1,524,174		158,583
리질리언스비용	6,244,050		7,780,564		158,583

표 11. 피해액과 복구비용의 상세 내역

구 분	피해액		복구비용		
	북부	서부	북부	서부	동부
사회부분					
Housing-cash grant	142,240	0	142,240		
Health	0	0	0		2,600
Agriculture	4,079,621	0	356,435		142,406
Education	73,948	0	73,948		
household items-Financial grant	63,500	498,234	4,800	498,234	
crops-Financial grant	0	691,722	34,500		
사회부분 합계	4,359,309	1,189,956	611,923	498,234	145,006
기반시설부분					
Roads (PDW)	1,135,000	299,860			
Roads (Rural)	735,000	665,000	735,000	665,000	
Crossing	0	502,000		502,000	
Transformer	0	50,000		50,000	
Non Cane Access Road	0	270,000		270,000	
Cane Access Road	0	641,000		641,000	
Rural Water Supply	27,081	0	27,081		
기반시설부분 합계	1,897,081	2,427,860	762,081	2,128,000	0
운영/행정			150,170		13,577
총합	6,256,390	3,617,816	1,524,174	2,626,234	158,583

더 심각하게 평가된다. 북부지역이 재난에 취약한 이유는 사이클론이 북부지역에 주로 영향을 미치기 때문으로 보인다. 앞서 3절에서 피지의 사이클론은 대부분 북서쪽에서 발생하여 남동쪽으로 이동함을 언급한 바 있다. 즉 일반적으로 북서쪽 섬들이 높은 피해 위험에 놓이기 되는데, 표 10는 그 중에서도 북부지역이 더 큰 피해 위험에 놓여 있음을 보여주고 있다.

표 11은 북부지역의 높은 리질리언스 비용이 대부분 피해액으로부터 기인하며, 특히 농업부분의 피해액이 높은 것을 보여준다. 기반시설부분 중에는 도로의 피해가 크다. 피지의 농업은 자급농업과 상업적 농업으로 구분되며, 상업적 농업의 경우, 대부분 사탕수수 경작에 해당한다. 특히 식민지 시대부터 서부지역과 북부지역에 걸쳐 존재하는 슈가벨트(Sugarcane belts)에서는 기계농업을 받아들여 사탕수수를 많이 경작하고 있으며, 피지 정부는 피지설탕공사(Fiji Sugar Corporation)를 운영 중이다. 근래에는 농업인구가 서비스업으로 대량 이동하면서, 사탕수수의 경작과 수출이 많이 줄었으나, 여전히 북부 지역에서는 사탕수수가 경제활동에 큰 부분을 차지한다. 한편 이 지역은 사이클론의 발생 빈도가 높은 지역으로, 이에 사이클론으로 인한 농업의 피해가 잦고 크다. 2009년 타이완

정부는 피지 정부에게 농업 생산과 관련하여 발생하는 GDP 하락폭을 줄일 것을 권고한 바 있으며, 호주 정부는 기후변화가 농업생산에 미치는 영향에 대처하기 위해 태평양 지역 섬국가에 \$150 million를 지원하기로 한 바 있다. Krishna-murthi(2008)은 사탕수수 경작 산업을 살리고 설탕 산업의 수익성을 높이기 위한 방안을 피지 정부에 제안한 바 있다.

반면 북부지역에 비해 도시화가 더 많이 진행된 서부지역의 경우, 기반시설부분의 피해액이 상대적으로 높다. 서부지역은 설탕산업, 관광산업, 제조업 등에 힘입어 급격한 도시화를 겪은 바 있으며, 현재 피지 인구의 40% 정도가 거주하고 있다(표 1). 표 11은 특히 도로 부분의 피해가 큼을 보여주고 있는데, 높은 도로 피해액은 북부지역에서도 관찰되는 현상이다. 비록 본 논문에서 깊이 다루지는 않으나, 피지는 폭우로 인한 도로의 피해가 잦으며, 우기에는 잦은 비로 도로 상태가 악화되어 여행객은 물론 거주자들의 불편을 야기하고 있다. 도로는 시장, 영업장, 서비스시설 등에 접근하는 중요한 이동 통로로써 빠르게 복구될 필요가 있으나, 복구 시간이 가장 많이 소요되는 기반시설 중에 하나이다. 이에 피지는 기후변화에 강한 도로 시스템을 구축할 필요가 있는 것으로 보인다.

5. 토 의

리질리언스 비용은 시스템영향 및 복구노력을 평가하기 위한 자료 또는 기술이 구축된다면, 국내에서도 방재력 측량을 위한 계량 지수로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 재해 조사가 미비한 국내 환경에서 적절한 자료를 찾는 것은 쉽지 않으며, 특히 복구노력을 평가할 수 있는 자료가 미비한 실정이다. 실제, 리질리언스 비용을 국가적 의사 결정에 활용하는 미국의 경우도, 자료 부족 문제로 인해 민관이 함께 활발히 자료를 구축하는 중이다. 이에 국내에서 제한된 방재 자원의 분배 및 취약성 분석을 위한 지수로써 리질리언스 비용을 활용하기 위해서는 무엇보다 재난 발생 이후 피해 내역 및 이로 인한 복구내역을 조사하는 시스템이 갖춰질 필요가 있다. 또한 리질리언스 비용이 상대적 비교를 통해 의미있는 분석을 할 수 있음을 고려할 때, 재난 피해 내역 및 복구 내역을 표준화된 재해 보고서 양식으로 보고할 필요가 있다. 최근 국내에도 도시 방재력 진단 지표가 개발되는 등 지표 연구가 수행되고 있다. 재해 보고서도 방재력 평가를 위한 지표를 기준으로 작성되고, 리질리언스 비용 등으로 정량화된다면, 리질리언스 비용의 절대적 수치가 취약 수준을 평가하는데 있어 의미있게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

본 연구는 특정 복구노력에 의한 리질리언스 비용을 계산하여, 사이클론에 더 취약한 지역을 평가하고, 취약 원인을 분석하였으며, 리질리언스 강화책을 논의하는데 활용하였다. 리질리언스 비용은 이외에도 최적의 복구 전략을 수립하는데도 활용될 수 있다. 이 경우 리질리언스 비용을 최소화시키는 복구전략을 계산할 필요가 있으며, 이를 위해서는 고난이도의 수학적 기술 및 수치모의 기술이 필요하다. 국내 수학 연구의 수준 및 수치 모의 기술은 선진국에 비해서 결코 뒤지지 않는다. 가까운 미래에 이들 기술들이 리질리언스 비용 평가에 활용된다면, 재해로부터 빠르게 회복될 수 있는 국가 시스템 및 지역 시스템, 즉 리질리언스 비용이 최소화되는 국가 시스템을 운영하는데 크게 도움이 될 것으로 기대된다.

6. 결 론

Vugrin 등(2010)에 의해 개발된 리질리언스 비용이 방재력을 비교하고 취약성을 분석하는데 있어 지수로 사용될 수 있음을 검토해 보고자 하였다. 리질리언스 비용은 시스템 영향과 복구노력의 합으로, 시스템 영향과 복구노력을 평가하는 방법에 따라 동일 재난과 동일 시스템의 리질리언스 비용이 달라질 수 있다. 이에 리질리언스 비용은 절대적인 수치보다는 상대적 비교값을 통해서 취약지역 및 취약원인을 분석하는데 활용할 수 있는 방법으로, 미국 국토안보부가 현재 국가기반시설 리질리언스 확보 연구에 활용 중인 개념이다.

피지의 사이클론 피해 사례를 통해 시스템 영향과 복구노력을 평가해 보았으며, 리질리언스 비용을 계산한 후 취약지역 및 취약원인을 분석하여 보았다. 연구 결과는 피지의 북부지역이 사이클론에 가장 취약한 지역임을 보여주었고 있다. 이는 기상학적으로 사이클론이 대부분 북서쪽에서 발달하여

남동쪽으로 이동하기 때문이며, 이와 함께 북부지역의 상업적 농업 활동이 사이클론에 크게 피해를 입기 때문이다. 한편, 인구가 많은 서부지역의 경우도 사이클론이 자주 발생하여 피해가 큰 편이며, 특히 도시화로 인해 기반시설의 피해가 크고, 그 중 도로의 피해가 가장 크다. 큰 도로 피해액은 서부지역 이외의 다른 지역에서도 관찰되는 현상으로, 도로 시스템의 중요성 및 복구 시급성을 고려할 때, 피지는 재해에 강한 도로 시스템을 구축할 필요가 있는 것으로 보인다. 이상의 연구 결과는 리질리언스 비용이 국가방재력을 평가, 취약원인을 찾아내고, 방재력 강화책을 모색하는데 있어 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다. 또한 지역 방재력을 비교하여 긴급 지원이 필요한 지역을 선정하는데도 도움이 될 수 있는 것으로 보인다.

참고문헌

- 국립방재교육연구원 방재연구소 (2010) **도시 방재력 진단을 위한 지표 및 체크리스트 개발**, 발간등록번호 11-1660080-000063-01.
- 김경남 (2008) **지역 방재력 평가에 관한 연구**, 연구보고 08-19.
- 유순영 (2011) 미래 자원환경지질 분야로서 국가기반시설 리질리언스 연구 동향 분석, **자원환경지질**, 제44권, 제6호, 533-539.
- 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 von Winterfeldt, D. (2003) A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- Chang, S.E. and Shinozuka, M. (2004) Measuring Improvements in the Disaster Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 3, pp. 739-755.
- Fiji Islands Bureau of Statistics (2007) *2007 Census of Population & Housing*.
- Fiji Meteorological Service (FMS) (2012) *Fiji's Climate*.
- Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, pp. 1-23.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J. and Thomalla, F. (2003) Resilience to natural hazards: how useful is this concept? Global Environmental Change Part B, *Environmental Hazards*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 35-45.
- Krishnamurthi, M. (2008) *A Brief Project Proposal for the Rehabilitation of the FIJIAN Sugar Industry, Development of By-Products and Improvement of the Standard of Living for the Farmers*.
- National Disaster Management Office (2003) *Report on Tropical Cyclone AMI*.
- National Disaster Management Office (2007a) *Report on February/March/April 2007 Flood and tropical cyclone cliff: Northern, eastern and western division*.
- National Disaster Management Office (2007b) *Report on Tropical Cyclone Daman, December 2007: Impact on Cikobia Island and Proposed Relief and Rehabilitation Programme*.
- National Disaster Management Office (2010a) *Tropical cyclone MICK Report 13th-16th December 2009. Damages Assessments, Response & Relief Actions and Rehabilitation & Reconstruction Recommendations*.
- National Disaster Management Office (2010b) *Tropical Cyclone Tomas Report 12th-16th March 2010. Damages Assessments, Response & Relief Actions and Rehabilitation & Reconstruction*.

- tion Recommendations.
- National Taskforce Cyclone Gene (2008) *TROPICAL CYCLONE GENE NATIONAL TASK FORCE REPORT*.
- Rose, A. (2007) Economic Resilience to Natural and Man-made disasters; Multidisciplinary origins and contextual dimensions, *Environmental Hazards*, Vol. 7, No. 4, pp. 383-398.
- Vugrin, E. D., Warren, D. E., Ehlen, M. A., and Camphouse, R. C. (2010) A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems: Simulation, Modeling, and Intelligent Engineering*, pp. 77-116.
- Vugrin, E.D. and Camphouse, R.C. (2011) Infrastructure resilience assessment through control design, *International journal of critical infrastructure*, Vol. 7, No. 3, pp. 243-260.
- Warren, D. E. and Vugrin, E. D. (2010) *Assessment of the resilience of chemical supply chains following hurricane IKE*.
- Wikipedia (2012) *2002-03 South Pacific cyclone season*.

© 논문접수일 : 12년 03월 30일
 © 심사의뢰일 : 12년 04월 02일
 © 심사완료일 : 12년 04월 12일