

기후변화 적응을 위한 연안 재해 회복탄력성 측정 모형의 개발 및 적용: 연안침식 사례를 중심으로

강승원* · 이문숙**†

* 한국해양과학기술원 연수연구원, ** 한국해양과학기술원 책임연구원

Development and Application of a Coastal Disaster Resilience Measurement Model for Climate Change Adaptation: Focusing on Coastal Erosion Cases

Seung Won Kang* · Moon Suk Lee**†

* Post Doctoral Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

** Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

요 약 : 기후변화는 연안지역에 심각한 영향을 미치고 있으며 그 영향이 점점 증가할 것이라고 예상되는 바, 최근 기후변화 적응 및 리스크 평가에 있어 많은 연구들이 취약성과 함께 회복탄력성 개념을 이용하고 있다. 본 연구의 목적은 기후변화 적응을 위한 연안재해 회복탄력성 측정 모형을 개발하는 것이다. 측정 모형 개발에 앞서 연안재해 회복탄력성에 대한 광범위한 문헌검토를 통해 취약성과 회복탄력성에 대한 조작성 정의와 함께 여러 피드백 메커니즘이 포함된 개념적 프레임워크를 작성하였다. 연안재해 회복탄력성 측정 모형은 네 가지 측정값(MRV, LRV, RTSPV, ND)과 연안재해 회복탄력성 복합 지수(CRI)를 포함하고 있으며, 개발된 지수는 국내 연안침식 사례에 적용되었다. 또한 지수 등급에 따른 지역적 분석이 수행되었다. 연구 결과, 네 가지 회복탄력성 측정값을 통해 각 지점이 가지는 연안침식 회복탄력성의 다양한 특성을 파악할 수 있음을 확인하였다. 연안 회복탄력성 복합 지수의 매핑 결과 서해안 및 남해안 지역에 비해 동해안 지역들은 연안침식 회복탄력성이 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구의 회복탄력성 측정 모형은 적응 이후의 이행전략에 대한 논의를 제공하는 도구로 활용될 수 있으며, 서로 다른 취약 지역 그룹 간 정책지원에 대한 우선순위를 결정하는 데 이용 가능하다.

핵심용어 : 회복탄력성, 연안 재해, 기후변화 적응, 연안 침식, 측정 모형

Abstract : Climate change is significantly affecting coastal areas, and its impacts are expected to intensify. Recent studies on climate change adaptation and risk assessment in coastal regions increasingly integrate the concepts of recovery resilience and vulnerability. The aim of this study is to develop a measurement model for coastal hazard recovery resilience in the context of climate change adaptation. Before constructing the measurement model, a comprehensive literature review was conducted on coastal hazard recovery resilience, establishing a conceptual framework that included operational definitions for vulnerability and recovery resilience, along with several feedback mechanisms. The measurement model for coastal hazard recovery resilience comprised four metrics (MRV, LRV, RTSPV, and ND) and a Coastal Resilience Index (CRI). The developed indices were applied to domestic coastal erosion cases, and regional analyses were performed based on the index grades. The results revealed that the four recovery resilience metrics provided insights into the diverse characteristics of coastal erosion recovery resilience at each location. Mapping the composite indices of coastal resilience indicated that the areas along the East Sea exhibited relatively lower coastal erosion recovery resilience than the West and South Sea regions. The developed recovery resilience measurement model can serve as a tool for discussions on post-adaptation strategies and is applicable for determining policy priorities among different vulnerable regional groups.

Key Words : Resilience, Coastal disasters, Climate change adaptation, Coastal erosion, Measurement model

* First Author : seungwon@kiost.ac.kr, 051-664-3723

† Corresponding Author : leems@kiost.ac.kr, 051-664-3726

1. 서론

기후변화는 전 세계 모든 지역과 거의 모든 부문에서 위협을 초래하고 있으며, 이러한 기후변화 추세가 지속되고 연안지역에 더 큰 영향을 미칠 것이라는 것은 논란의 여지가 없다(Wong et al., 2014; Toimil et al., 2020). 연안 시스템에 대해 예상되는 영향(해수면 상승, 폭풍 해일 증가, 해수 범람 및 수질 악화 등)은 연안 지역의 인구 및 경제 활동에 심각한 영향을 미치고 있으며, 기후변화 대응에 대한 다양한 수준의 의사결정자의 관심을 증가시키고 있다(Field and Barros, 2014; Torresan et al., 2016). 지금까지 연안 지역사회는 기후변화에 대한 취약성을 중심으로 기후변화가 지역사회에 어떤 영향을 미칠 것으로 예상되는지, 그리고 어떤 조치를 취해야 준비할 것인지를 구체적으로 설명하는 적응계획을 수립해왔다(Woodruff and Stults, 2016).

최근 점점 더 많은 도시들이 기후변화의 영향에 대비하기 위해 취약성을 넘어 회복탄력성의 개념을 이용하고 있다(Kythreotis and Bristow, 2017). 취약성에서 회복탄력성으로의 변화는 기후 변화에 대한 도시들의 대응 계획에 중요한 영향을 미친다. 연안 지역의 회복탄력성 계획은 위험과 취약성을 평가하는 것을 넘어 확장될 수 있다. 연안 재해 취약성 평가 결과는 기후변화가 초래한 연안재해의 강도 및 빈도 변화에 대해 연안지역이 적응하는 방안을 제안하는데 사용된다. 반면, 연안 재해 회복탄력성 평가 결과는 연안 재해에 대한 적응 및 대응 전략의 개발을 넘어, 적응 이후의 이행전략을 위한 정책 개발에 사용될 수 있다(Anjos and de Toledo, 2018).

기후변화 적응 전략을 개발하기 위해 몇몇 연구들은 재해에 대한 지역사회의 회복탄력성을 평가해왔다. 관련된 초기 연구들은 대부분 회복탄력성의 질적 개념을 바탕으로 지역사회의 기후변화 취약성을 평가하였다(Bruneau et al., 2003; Chang and Shinozuka, 2004; Cutter et al., 2008). 이러한 연구들은 재해 대응 및 복구의 맥락에서 회복탄력성을 평가할 수 있는 개념적 프레임워크를 제안하였지만, 재해 회복탄력성의 개념을 정량화하고 평가하는데 사용할 수 있는 지표를 제안하지는 못하였다.

회복탄력성의 측정 및 정량화에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 분야에서 회복탄력성과 그 구성요소에 대한 지표(indicators) 혹은 메트릭(metrics)이 제시되었다. 재해 분야에서는 “공학적 회복탄력성(engineering resilience)” 개념을 바탕으로 재해로 인한 교란의 일시적인 영향과 그에 따른 도시(시스템) 기능의 회복에 초점을 맞추어 측정 방법이 제안되었다(Ingrisch and Bahn, 2018; McClymont et al., 2020; Zevenbergen et al., 2020). 회복탄력성 정량화하는 가장 일반적인 방법으로 시뮬레이션 기반 및 대리 지표 기반 접근방식이 사용되었다.

시뮬레이션 기반 정량화 방법은 재해 이벤트 발생에 따른 시스템의 성능 변화를 직접적으로 측정 가능하며, 대리 지표 기반 방법은 비교적 쉽게 정량화가 가능하고, 지리적 경계를 넘어 다양한 맥락과 위험에 적용할 수 있다는 장점이 있다(McClymont et al., 2020). 하지만 이러한 연구들은 회복탄력성을 하나의 총량으로 계산하는 등 회복탄력성 개념이 가지는 다양한 속성을 다루지 못했다는 한계를 가진다.

이후 회복탄력성이 가지는 다양한 속성인 ‘4R(robustness, redundancy, resourcefulness, rapidity)’이 제안됨에 따라 일부 연구에서는 회복탄력성의 속성을 포함한 정량화 방법을 제안하였다. 예를 들어, Simonovic(2018)은 4R 개념을 기반으로 자연 재해의 충격 및 교란에 의한 시스템 성능 변화(기능 곡선)를 측정 하는 동적 측정 모형을 제안하였다. 하지만 Simonovic(2018)의 측정 모형은 실제 상황에서 나타나는 복잡한 시스템의 기능 변화를 다루지 못한다는 한계를 가진다.

본 연구의 목적은 기후변화 적응을 위한 연안 재해 회복탄력성 측정 및 평가 모형을 개발하는 것이다. 구체적으로, 1) 문헌 검토를 통해 정의된 연안 재해 회복탄력성에 대한 개념적 프레임워크를 작성하였으며, 2) 프레임워크에 기반을 둔 네 가지 회복탄력성 측정값과 복합 지수가 개발되었다. 3) 개발된 지수는 연안 침식을 사례로 적용되었으며, 지수 등급에 따른 지역적 분석이 수행되었다. 본 연구에서 제안되는 개념적 프레임워크는 4R 등 회복탄력성이 가지는 다양한 속성을 반영하였으며, 회복탄력성 측정값들은 발생 가능한 복잡한 시스템의 기능 변화를 포함하도록 고안되었다는 점에서 기존 연구들에 대한 연구 격차가 존재한다.

2. 이론 및 선행연구

2.1 회복탄력성의 개념과 구성요소(4R)

생태학에서 파생된 회복탄력성 개념은 ‘다시 되돌아가다’라는 뜻을 가진 라틴어 ‘resiliere’에 뿌리를 두고 있다(Klein et al., 2003). 회복탄력성 개념은 지난 몇 십년간 급격한 변화에 반응하고 대처하는 시스템의 성능을 식별하기 위해 다양한 분야에서 사용되고 진화되어왔기 때문에, 다양하게 정의되고 있으며 개념적으로 모호성을 가지고 있다. 재난연구 분야에서는 재해의 충격을 흡수하고 피해를 복구하는 시스템의 능력을 설명하고자 회복탄력성의 개념이 적용되기 시작하였다(Timmermann, 1981). 재해 회복탄력성에 대한 정확한 정의는 합의되지 않았지만, 대부분의 문헌은 재해 회복탄력성이 지역사회의 준비, 계획, 흡수, 복구 능력을 향상시킨다는 공통된 관점을 제공한다(Cutter et al., 2014). 원래의 생태학적 맥락에서는 충격 이전 상태로 다시 튕겨 나간다는 개념으로 회복탄력성이 정의되었지만, 재난 맥락에서는 단순히 다시 튕

겨내는 것이 아니라 앞으로 뿔겨나가는 것, 즉 개선 여부의 측정을 포함하는 것으로 확장되었다(Manyena et al., 2011).

한편, Brunau et al.(2003)은 지역사회 복원력의 특성을 ‘내구성(Robustness)’, ‘대체성(Redundancy)’, ‘신속성(Rapidity)’, ‘자원동원성(Resourcefulness)’ 등 4R로 요약하였다. 4R 프레임워크는 재난 분야를 포함하여 다양한 분야의 복원력 연구에 적용되어 왔다. 재해 회복탄력성 관점에서 내구성(robustness)은 시스템과 그 구성요소가 얼마나 성능 감소 없이 재해에 견딜 수 있는지를 측정하며, 대체성(redundancy)은 시스템 기능에 재해로 인한 손실이 발생한 경우 원래의 기능을 대체할 수 있는 여분 확보 능력이 있는지를 측정한다. 신속성(rapidity)은 재해 피해 발생 시 시스템이 원래의 기능을 얼마나 신속하게 회복할 수 있는지를 측정하며, 자원동원성(resourcefulness)은 재해로 인한 교란 기간 동안 새로운 균형을 달성할 수 있는 잠재력 역량이 어느 수준인지를 측정한다. 최근의 연구는 Fig. 1과 같이 설계 및 운영단계를 넘어 ‘위험회피(risk avoidance)’ 및 ‘복구(recovery)’를 포함하여 4R 프레임워크를 더욱 세분화하고 있다(Laboy and Fannon, 2016; Zevenbergen et al., 2020).

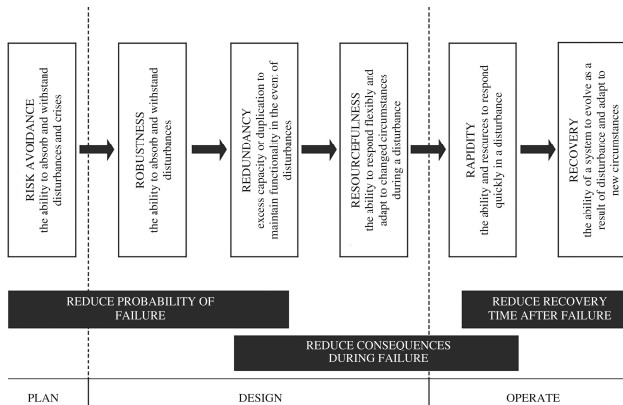


Fig. 1. Resilience framework based on the 6R model (source: Zevenbergen et al., 2020).

2.2 회복탄력성 정량화 연구

회복탄력성의 정량화는 시뮬레이션 기반 접근(Owotoki et al., 2006; Mugume et al., 2015; Birgani and Yazdandoost, 2016; Schinke et al., 2016), 대리 지표 기반 접근(Qasim et al., 2016; Keating et al., 2017; Miguez and Veról, 2017) 기능 곡선 기반 접근(Chang and Shinozuka, 2004; Simonovic and Peak, 2013; Simonovic, 2018) 등 다양한 방식으로 시도될 수 있다. 본 연구의 회복탄력성 측정값은 시스템의 기능 곡선을 기반으로 계산되기 때문에, 본 장에서는 기능 곡선 기반 접근 방식을 사용한 연구들이 제시되었다.

재해 회복탄력성과 같은 공학적 회복탄력성의 맥락에서, 한 지역의 회복탄력성 수준은 일반적으로 손상된 기능의 손실과 많은 원인으로 인한 지연을 고려하여 이 기능이 얼마나 빨리 복구될 수 있는지에 달려 있다(Singh et al., 2022). 이러한 관점에서 회복탄력성 수준의 측정은 교란으로 인한 손상과 복구과정 속에서 변화하는 시스템의 기능 곡선에 초점을 맞춘다. 기능 곡선을 사용함으로써 여러 유형의 위험에 노출된 다양한 시스템과 지역사회의 복원력을 정량화될 수 있다. Fig. 2는 회복탄력성 정량화에 사용되는 기능 곡선과 회복탄력성 4R간의 관계를 보여준다.

연구자에 따라 기능 곡선에서 회복탄력성 측정값이 다양하게 계산되지만, 일반적으로 기능 곡선 기반 회복탄력성 정량화는 대부분 Brunau et al.(2003)에서 제시된 회복탄력성 삼각형을 기반으로 적용 및 확장된다(Fig. 3). 예를 들어, Singh et al.(2022)는 회복탄력성 삼각형을 형성하는 기간

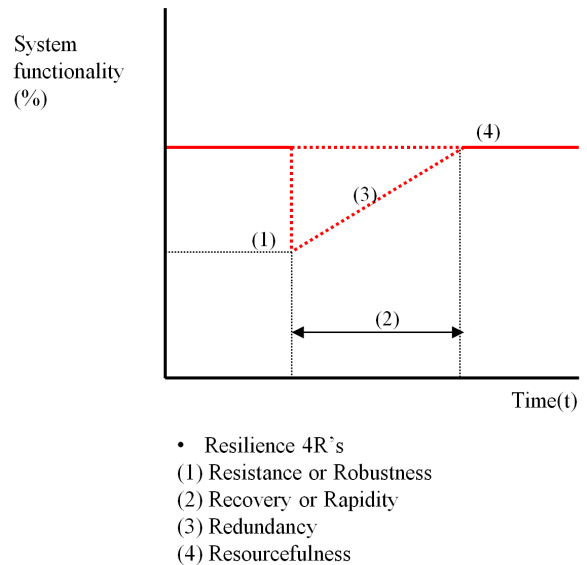


Fig. 2. Resilience functionality curve and resilience 4R's.

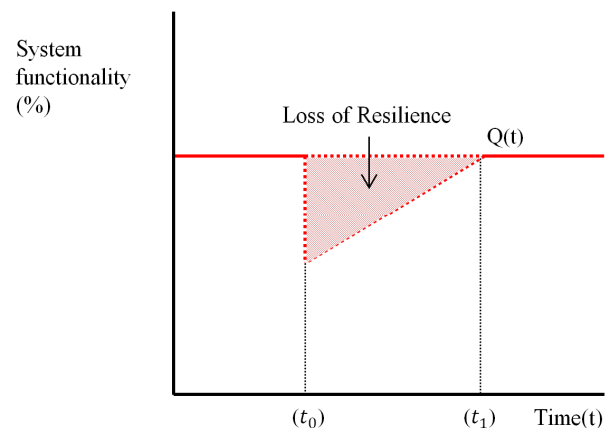


Fig. 3. Concept of resilience triangle.

의 차이를 바탕으로 간단하게 회복탄력성을 측정하는 방법을 소개하였다. Fig. 3에서 교란이 발생하기 전 정상상태가 100이라고 가정하였을 때, 회복탄력성은 재해 발생 시점(t_0)부터 복구 시점(t_1)아래의 면적을 사용하여 식(1)과 같이 정량화될 수 있다.

$$Resilience = \int_{t_0}^{t_1} \frac{[Q(t)]dt}{100*(t_1 - t_0)} \quad (1)$$

하지만, 회복탄력성 삼각형을 기반으로 한 측정 방법은 회복기간이 다소 자의적이기 때문에 다양한 시간 기준을 사용한다면 값이 달라진다는 문제가 발생한다(Singh et al., 2022). 또한 다양한 회복탄력성 속성을 나타내지 못한다는 한계가 존재한다.

Simonovic(2018)은 보다 다양한 회복탄력성 속성을 고려한 측정 방법을 제안하였다. 이 연구는 동적 공간 회복탄력성 개념을 기반으로 의사 결정을 지원하기 위해 최대복원력(MRV, Maximum Resilience Value), 최소복원력(LRV, Lowest Resilience Value), 최대 복원력으로의 소요 시간(TFRV, Fastest Recovery Time of System Performance), 최저 복원력으로의 소요 시간(TLRV, Time to Lowest Resilience Value) 등의 네 가지 측정값을 제시하였다. Simonovic(2018)의 회복탄력성 측정 모형은 시스템 교란 대응에 대한 최상의 해결책을 얻기 위해 고안되었다. 따라서 가상의 상황에 대한 시뮬레이션 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

3. 연안재해 회복탄력성 측정 모형

3.1 조작적 정의 및 개념적 프레임워크

본 연구에서 취약성은 연안재해 이벤트가 발생하는 동안 시스템 또는 시스템의 일부가 부정적으로 반응할 수 있는 정도를 의미한다. 그리고 회복탄력성은 개념상 취약성의 역수로, 연안재해 이벤트가 발생한 후 도시 및 생태계 시스템의 기능이 근본적인 변화 없이 이벤트의 영향을 흡수하고 복구할 수 있는 능력을 의미한다. 회복탄력성의 평가는 연안 재해로 인해 변화하는 도시 혹은 생태계 성능의 측정과 일련의 시스템 성능 변화의 원인 규명에 따라 이루어진다. 이때 시스템 성능의 변화는 다양한 피드백 메커니즘을 통해 발생한다. 본 연구의 회복탄력성 측정 모형은 이러한 방식으로 통합된 시스템 성능의 변화를 설명한다.

Fig. 4는 연안재해 회복탄력성에 대한 본 연구의 개념적 프레임워크로 연안재해 취약성 및 회복탄력성과 관련된 다양한 피드백 메커니즘을 보여준다. 첫 번째 메커니즘은 기후변화로 인한 영향으로, 기후변화는 연안재해가 연안지역에 미치는 직접적 영향(빈도 및 강도)과 연안지역의 취약성

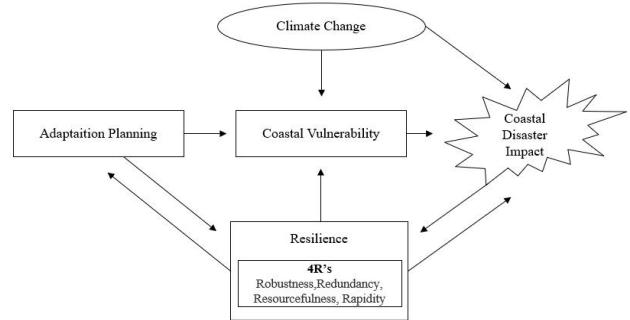


Fig. 4. Conceptual framework for coastal disaster resilience in this study.

에 지속적으로 영향을 미친다. 두 번째 메커니즘은 연안재해의 영향과 관련 있으며, 기후변화 및 연안지역의 취약성으로 인해 증가 혹은 감소된 연안재해의 영향은 연안지역의 회복탄력성에 영향을 미친다. 세 번째 메커니즘은 회복탄력성과 관련 있으며, 연안재해 이벤트로 인해 연안지역의 시스템 성능은 손상되었다가 다시 회복될 수 있다. 이 과정에서 4R과 같은 회복탄력성의 속성은 시스템 성능 변화를 조절함으로써 연안 취약성과 이후 발생하는 연안재해의 영향을 감소 혹은 증가시킨다. 또한 회복탄력성의 속성은 연안 취약성을 완화시킬 수 있는 적응 계획 수립 및 관련 의사결정에 도움이 될 수 있다.

연안재해 회복탄력성에 대한 개념적 프레임워크는 연안재해와 관련된 취약성 및 회복탄력성 시스템의 피드백 구조를 설명한다. 또한 개념적 프레임워크의 목적은 회복탄력성 측정 모형에서 고려해야 할 다양한 정보를 제공하는 것을 포함한다.

3.2 회복탄력성 측정 모형

회복탄력성 측정의 목적은 교란으로 인해 발생하는 시스템의 성능의 변화를 정량화하는 것이다. Fig. 4에서 회복탄력성은 연안재해 취약성 완화를 위한 적응 계획과 피드백 구조를 가진다. 따라서 본 연구에서 제안하는 회복탄력성 측정 모형의 목적은 시스템 성능 변화의 정량화뿐만 아니라 회복탄력성 4R에 대응하는 다양한 정책 변수를 연결할 수 있는 지수들의 개발을 포함한다.

기존 연구의 측정 모형 중 본 연구의 목적에 가장 부합하는 모형은 Simonovic(2018)에서 제안되었다. Simonovic(2018)은 회복시간과 시스템 성능 수준에 따른 네 개의 서로 다른 지수를 포함한 동적 공간 회복탄력성 측정 모형을 소개하였다. 하지만 Simonovic(2018)의 측정 모형은 연안 재해에 대해 적용함에 있어 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫 번째는 측정 시점에 대한 문제로 Simonovic(2018)의 모형은 시뮬레이션을 기반으로 적용되기 때문에 이상적인 상황에서의 측정 시

기후변화 적응을 위한 연안 재해 회복탄력성 측정 모형의 개발 및 적용: 연안침식 사례를 중심으로

점을 선택할 수 있다. 하지만 실제 연안재해의 영향에 따른 시스템의 성능 변화는 Fig. 5에서 제시된 바와 같이 매우 복잡하게 나타난다. 즉, 연안재해의 영향을 다루기 위해서는 복잡하게 나타나는 시스템의 성능 변화를 포착하여 일련의 측정값으로 계산할 수 있는 측정 모형이 사용되어야 한다. 두 번째와 세 번째는 교란 시점과 교란 횟수에 대한 문제로, 연안 재해의 경우 시스템 교란되기 전 정상상태나 교란된 시점을 알기가 어렵고, 시스템이 회복되었다더라도 다시 교란되는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 관련된 관측 데이터가 부족할수록 더욱 부각된다. 즉, 교란 시점과 교란 횟수에 대한 측정값을 포함하는 모형이 필요하다.

Fig. 6은 본 연구의 연안재해 회복탄력성 측정 모형을 나타낸다. 본 연구에서 회복탄력성 측정 모형을 통해 네 가지 측정 지표를 제안한다: MRV(Maximum Resilience Value), LRV(Lowest Resilience Value), RTSPV(Recovery Time of System Performance Value), ND(Number of Disturbances).

먼저, 최대 및 최저 회복탄력성 값인 MRV와 LRV는 각각 측정 시점 내에서 회복탄력성이 가장 높았던 시스템 성능 값과 회복탄력성이 가장 낮았던 시스템 성능 값을 나타낸다. MRV를 통해 시스템 기능이 교란 이후 얼마나 회복할 수 있는지, LRV를 통해 시스템 교란을 얼마나 저항할 수 있는지 측정할 수 있다. 다음으로 RTSPV는 시스템 성능의 회복 시간을 나타낸다. LRV에서 MRV로 도달하는데 걸리는 시간은 RTV(Recovery Time Value)로 측정된다. 이때 교란 주기가 여러 번 나타날 경우 회복시간 여러 번 관측될 확률이 높기 때문에, RTSPV는 RTV의 평균을 사용하여 계산된다. 최종적으로 RTSPV는 식(2)와 같이 계산된다.

$$RTSPV = \frac{1}{((MRV - LRV) / ATRV)} \quad (2)$$

- (1) MRV (Maximum Resilience Value)
 - (2) LRV (Lowest Resilience Value)
 - (3) RTV (Recovery Time Value)
 - (4) ARIV (Average Recovery Time Value)
 - (5) RTSPV (Recovery Time of System Performance Value)
- $$\frac{1}{((MRV - LRV) / ATRV)}$$
- (6) DP (Disturbance Period)
 - (7) ND (Number of Disturbances)

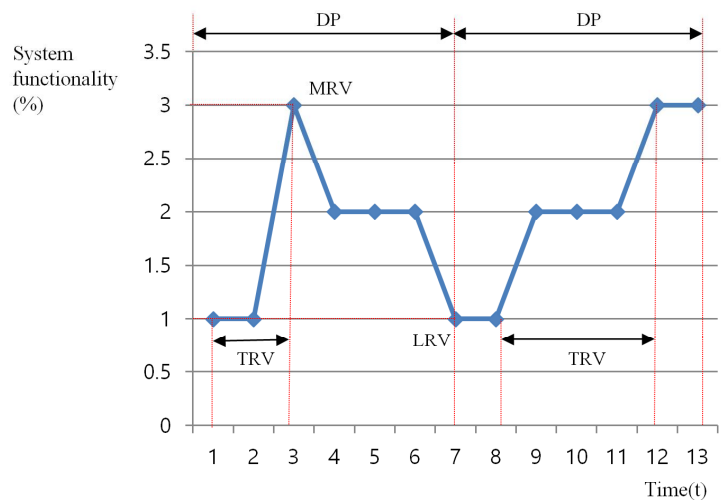
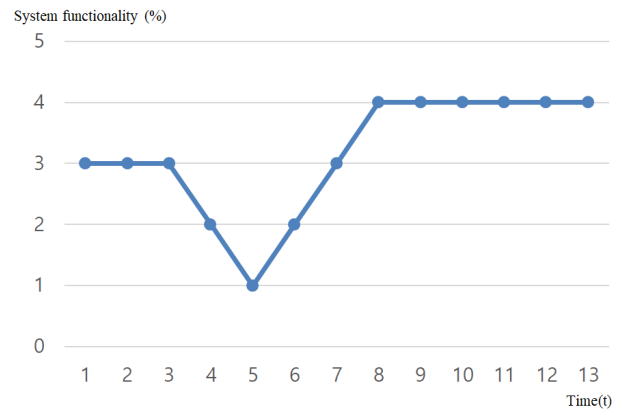
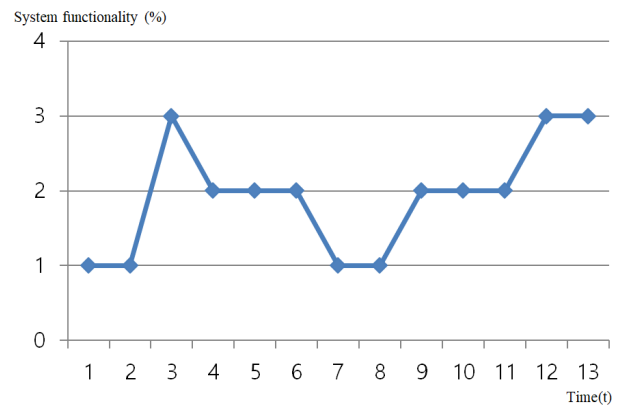


Fig. 6. Measurement model for the resilience of coastal disaster in this study.



(a) Changes in system performance suggested in the theory



(b) Changes in system performance in real-world situations

Fig. 5. Comparison of changes in system performance in two situations.

만약, RTSPV가 (MRV-LRV)/ATRV로 계산된다면 회복 시간이 나타나지 않는 지역의 값은 0이 되는데, 이 경우, 값이 0이 나타난 지역이 가장 회복탄력성이 높은 지역으로 해석될 수 있다. 이를 방지하기 위해 RTSPV는 (MRV-LRV)/ATRV의 역수로 계산된다. 마지막으로 ND는 교란 횟수를 나타낸다. ND를 통해 교란전 상태 혹은 최대 복원력에서 다시 최저 복원력으로 교란되는 주기(DP)의 횟수를 측정하고자 하였다.

4. 측정 모형의 적용

4.1 측정모형 적용 방법

본 연구는 여러 연안재해 중 연안침식을 대상으로 회복탄력성 측정 모형을 적용하였다. 이를 위한 시스템 성능 변수는 연안침식 등급을 사용하였다. 연안침식 등급은 연안관리법 제5조(연안기본조사 등)에 근거하여 실시되고 있는 연안침식실태조사의 결과물이다. 해양수산부는 2003년 대상지역 62개소를 시작으로, 매년 침식이력조사를 수행하고 침식지역을 등급화하여 관리하고 있다. 2022년 기준 연안침식 등급평가는 전국 360개소를 대상으로 수행되고 있다. 연안침식 등급은 총 네 가지로 분류되고 있다(A: 양호, B: 보통, C: 우려, D: 심각). 2022년 기준 전국 연안지역의 등급별 현황은 360개의 대상지역 중 A등급 18개소, B등급 181개소, C등급 133개소 D등급 28개소로 나타났다. 연안침식 등급은 Table 1과 같이 현지주민의 인지도, 현지조사자의 인지도, 해변 모래질의 변화, 해변폭의 변화, 해변고도 및 포락지의 변화, 배

Table 1. Items and criteria of coastal erosion rating evaluation

Evaluation item	Score	Evaluation criteria
A. Recognition of the local people	10	Degree of erosion and risk of damage
B. Recognition of a field investigator	15	Degree of erosion and risk of damage
C. Changes in beach sand quality	15	Evaluation of coarsening and fining of sand quality
D. Changes in beach Width	20	Beach width and degree of increase or decrease in dune envelope
E. Changes in beach altitude and envelope	20	Degree of increase or decrease in beach altitude and dune envelope slope
F. Hinterland hazard level	20	Status of damage to private homes and facilities in the hinterland
Total	100	

후지 위험도 등 여섯 가지 항목을 바탕으로 평가된다. 연안침식 실태조사 대상 지역별로 평가 시작연도가 상이하기 때문에, 본 연구에서는 최대한 많은 샘플을 포함하기 위해 2010년부터 2022년까지 평가된 127개소의 연안침식 등급을 사용하였다.

회복탄력성 측정 변수 계산은 총 네 가지 단계를 거쳐 진행되었다. 첫 번째로 각 지역의 침식등급을 1-4의 순위형 데이터로 변환하였다(A→4, B→3, C→2, D→1). 두 번째는 그래프 작성 단계로, 순위형 데이터로 변환된 각 지역의 연도별

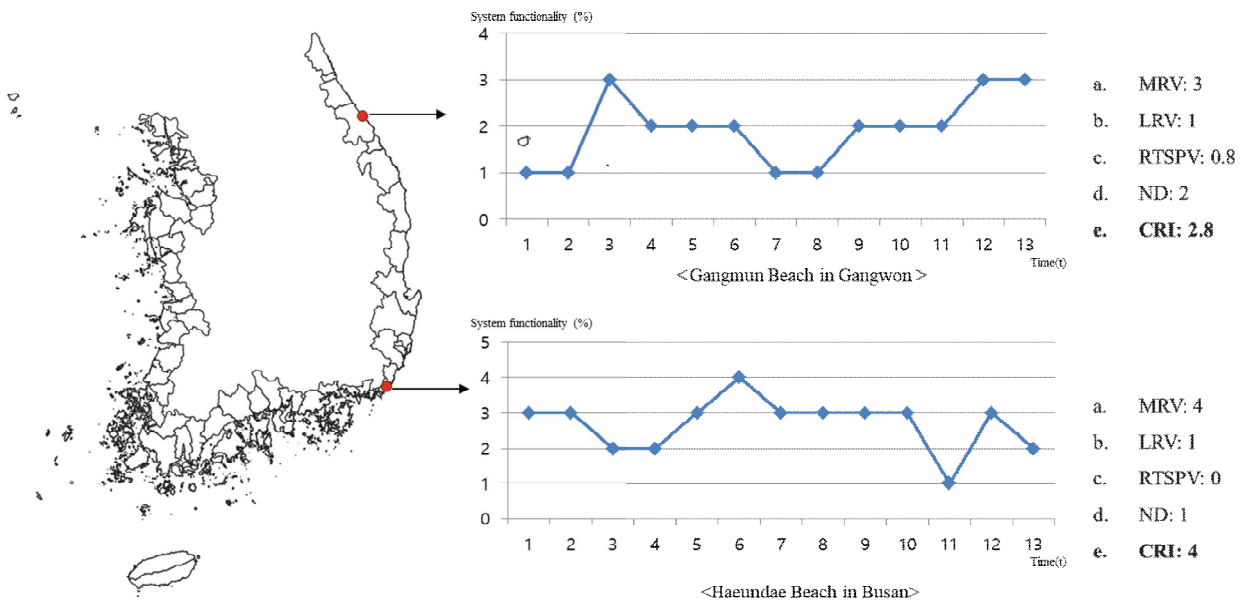


Fig. 7. Comparison of measurement variable values for two coastal erosion points.

기후변화 적응을 위한 연안 재해 회복탄력성 측정 모형의 개발 및 적용: 연안침식 사례를 중심으로

침식 등급의 꺾은선 그래프를 작성하였다. 세 번째 단계에서는 본 연구의 회복탄력성 측정모형을 바탕으로 네 가지 측정 변수(MRV, LRV, RTSPV, ND)를 계산하였다. 마지막 단계는 최종 지수 계산으로, 연안 회복탄력성 지수인 CRI(Coastal Resilience Index)는 식3과 같이 계산된다.

$$CRI = MRV + LRV + RTSPV - ND \quad (3)$$

Fig. 7은 서로 다른 두 연안침식 지점에 대한 측정 변수 값들의 비교를 보여준다. Fig. 7에서 위쪽 그래프는 강원도 강문 해수욕장을 대상으로 작성되었고, 아래쪽 그래프는 부산광역시 해운대 해수욕장을 대상으로 작성되었다. 강문해수욕장의 MRV는 3으로 시점3과 시점12에서 최대 회복탄력성 값이 나타났다. LRV는 1으로 시점1~2와 시점7~8에서 최저 회복탄력성 값이 나타났다. 강문 해수욕장은 두 번의 교

란 주기가 존재하며(시점1~7, 시점8~13), 평균 회복시간(RTV)은 2.5, 시스템 성능의 회복시간 값(RTSPV)은 0.8로 나타났다. 강문해수욕장의 CRI값은 2.8로 계산되었다.

반면 해운대 해수욕장의 MRV는 4, LRV는 11로, 각각 시점6, 시점11에서 최대 및 최소 회복탄력성 값이 나타났다. 해운대해수욕장은 MRV에서 다시 LRV로 교란되는 주기가 한 번밖에 나타나지 않았다. 해운대 해수욕장은 측정 시점 내에서 최저 회복탄력성으로 시스템 성능이 떨어진 이후 최대 회복탄력성으로 다시 회복되지 않았기 때문에 RTSPV는 0으로 측정되었다. 해운대 해수욕장의 CRI 값은 4로 계산되었다. 두 연안침식 지점의 회복탄력성 측정값을 비교해보았을 때, 해운대 해수욕장은 강문 해수욕장에 비해 시스템 성능의 회복시간 값은 떨어졌으나, 상대적으로 최대 회복탄력성이 높게, 교란횟수가 낮게 나타났기 때문에, 해운대 해수욕장의 연안 재해 회복탄력성이 더 높은 것으로 나타났다.

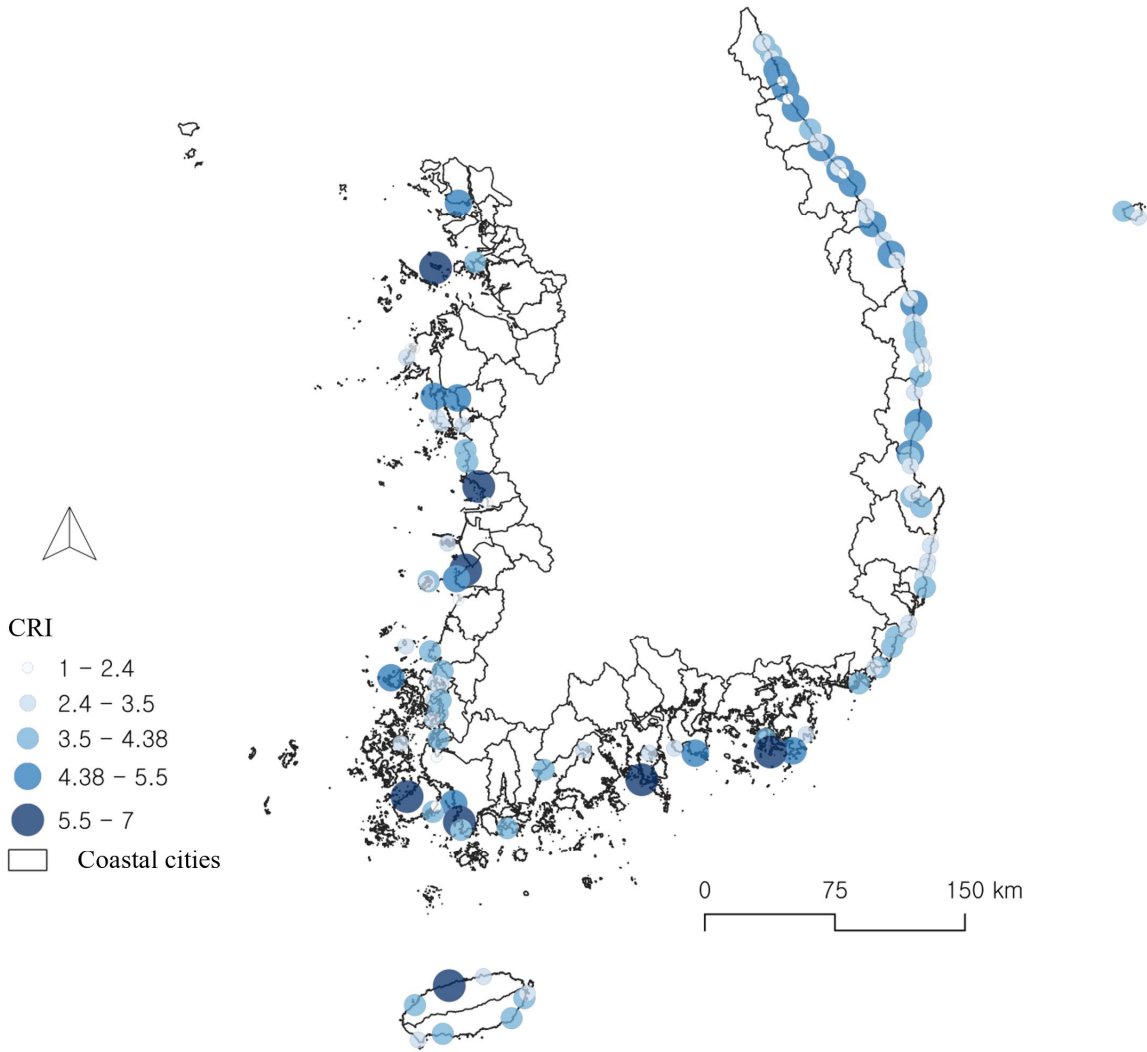


Fig. 8. Coastal resilience index mapping.

측정 모형 적용을 위한 CRI 매핑은 2022년 기준 연안침식 등급평가 지점 전국 360개소 중 본 연구의 측정 시점(2010~2022년)의 평가 결과를 모두 포함하고 있는 127개소에 대해 수행되었으며, 총 다섯 개의 등급으로 분류된 지점들이 전국 연안 도시 지도에 표현되었다.

4.2 측정모형의 적용 및 지역적 분석

연안재해 회복탄력성 측정 모형의 적용을 위해 최종 지수인 CRI의 분포를 활용하였다(Fig. 8). CRI는 Jenks natural breaks 분류법을 통해 매핑되었다. Jenks natural breaks 분류 방법은 서로 다른 클래스에 대한 값의 최적 배열을 결정하기 위해 설계된 데이터 분류 방법으로 집단의 평균이 각 집단 평균에서 벗어나는 것을 최소화함과 동시에 각 집단의 평균이 다른 집단의 평균에서 벗어나는 것을 최대화한다(Chen et al., 2013).

Fig. 8에서 주목할 만한 결과는 CRI 값의 가장 상위 분류 등급에 포함된 지점들의 분포 양상이다. CRI 값 5.5 이상을 나타낸 지점 모두 서해안과 남해안에 위치하고 있으며, 동해안에서는 높은 등급의 CRI값을 가진 지점들이 위치하고 있지 않았다. 이는 동해안의 연안침식 회복탄력성이 서해안과 남해안에 비해 상대적으로 떨어진다는 것을 의미한다.

Table 2는 CRI 상위 등급에 포함된 지점들의 회복탄력성 측정값들을 보여준다. CRI 상위 등급에는 부안군 변산, 서천군 다사지구, 해남군 미학, 진도군 거제, 여수시 여석, 통영시 비진도, 용진군 장골, 제주시 이호, 영덕군 부경리 등 총 9개 지역이 포함되었다. 그중 부안군 변산과 서천군 다사지구는 CRI 7로 전국에서 가장 높은 회복탄력성을 나타내었다. 해당 지점들은 최대 및 최소복원력 값이 상대적으로 높

게 나타났으며, 빠른 회복시간과 낮은 교란 횟수를 나타냈다. 진도군 거제, 여수시 여석, 통영시 비진도는 2번의 교란 횟수가 관측되었으나, 타 지점들에 비해 상대적으로 높은 시스템 성능 회복시간 값을 나타냈다.

Fig. 9는 가장 높은 CRI값을 가진 부안군 변산 해수욕장과 서천군 다사지구의 회복탄력성 시스템 성능 변화 그래프를 보여준다. 두 지점 모두 2018년을 기점으로 큰 변화가 발생하였다. 부안군 변산 해수욕장의 경우 2018년 이후 해수욕장 주변에서 관광지 조성 공사가 이루어졌다. 대규모 공사에도 불구하고 변산 해수욕장은 큰 연안침식 등급 하락 없이 높은 회복탄력성을 유지하였다. 이러한 사례를 바탕으로 변산 해수욕장은 특히 4R 중 내구성(Robustness)에 대한 회복탄력성이 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 서천군 다사지구의 경우 2018년 기준 침식등급이 C로 판정되었다. 2018년 이후 다사지구에는 사구포락 방지대책 및 주기적 해안환경정화작업 등의 연안정비공사가 이루어졌다. 연안정비로 인해 다사지구의 침식등급은 1년 만에 A등급으로 상향되었으며, 이후 큰 침식등급의 하락 없이 높은 회복탄력성을 유지하고 있다. 다사지구는 4R 중 특히 신속성(Rapidity)에 대한 회복탄력성이 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Table 2. Coastal area within CRI 5.5 to 7

Name	MRV	LRV	RTSPV	ND	CRI
Byeonsan, Buan	4	2	2	1	7
Dasa-ri, Seocheon	4	2	2	1	7
Mihak, Haenam	4	2	1	1	6
Geoje, Jindo	4	2	2	2	6
Yeoseok, Yeosu	4	2	2	2	6
Bijindo, Tongyoeung	4	2	2	2	6
Janggol, Ongjin	4	2	0.66	1	5.67
Iho, Jeju	4	2	0.66	1	5.67
Bukyeong, Yeongdeok	4	2	0.5	1	5.5

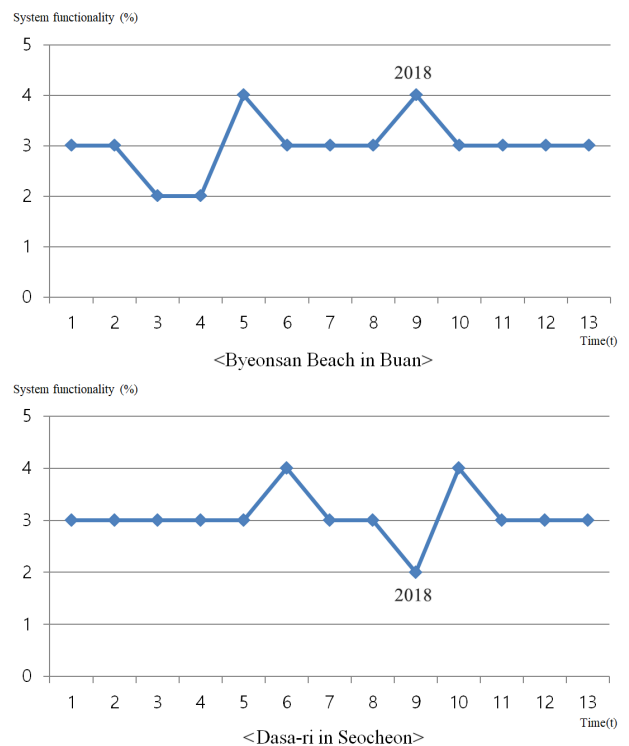


Fig. 9. Changes in resilience system performance in the two coastal area with the highest CRI.

5. 결론

본 연구는 연안재해에 대한 회복탄력성을 평가할 수 있는 측정 모형을 제안하였다. 측정모형은 복잡한 시스템 성능의 변화를 측정할 수 있는 네 가지 회복탄력성 측정값과 복합지수를 포함하여, 이는 연안재해에 대한 다양한 피드백 메커니즘으로 구성된 개념적 프레임워크를 기반으로 개발되었다. 특히, 기존 측정 지수 방법론에서 반영하기 어려웠던 측정 시점, 교란 시점, 교란 시기 등을 다루는 측정 방법론이 제시되었다. 연안 침식을 대상으로 본 연구의 측정 모형이 적용되었으며, 네 가지 회복탄력성 측정값을 통해 각 지점이 가지는 연안침식 회복탄력성의 특성을 파악할 수 있음을 확인하였다. 연안 회복탄력성 복합 지수의 매핑 결과 국내에서 연안침식 회복탄력성이 높게 나타난 지점은 모두 서해안과 남해안 지역에서 발견되었으며, 동해안 지역들은 연안침식 회복탄력성이 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다.

본 연구의 회복탄력성 측정 모형은 지금까지 취약성 기반으로 진행되어 왔던 연안재해 리스크 평가 프레임워크에서 회복탄력성을 기반으로 적응 이후의 이행전략에 대한 논의를 제공하는 도구로 활용될 수 있다. 회복탄력성 측정 모형은 연안재해 리스크와 관련된 다양한 측면의 종속 변수를 제공하기 때문에, 여러 연안재해 적응 정책과 연결되어 정책들의 효과성 측정에 활용될 수 있다. 측정 모형의 측정값과 복합지수는 회복탄력성의 여러 특성을 포함하여 지역 간 차이를 도출할 수 있기 때문에, 서로 다른 연안 재해 취약 지역 그룹 간 정책지원에 대한 우선순위를 결정하는 데 이용 가능하다.

예를 들어 현재는 연안침식관리구역 지정을 위한 기준으로 연안침식등급을 결정하는 해변폭 및 단면적의 변화(침식률)와 취약도 분석 결과 값이 절대적이다. 연안정비사업 대상지를 선정할 때에도 연안침식 등급 변화가 우선 고려된다. 만약 본 연구를 통해 제시된 4R에 대한 회복탄력성 평가를 실시할 경우 재해예방의 대상이 성능 감소 없이 재해에 얼마나 견딜 수 있는지, 재해로 인한 손실이 발생한 경우 원래의 기능을 대체할 여분의 능력이 있는지, 재해 피해 발생 시 회복에 얼마나 시간이 소요되는지, 재해 피해에 대한 자연 복구 역량이 어느 정도인지 세분화하여 정량적으로 평가한 결과를 관리구역 및 정비사업 지역 선정 및 우선순위 결정에 반영할 수 있다. 또한 관리구역 및 정비사업의 효과를 평가하는 경우에도 관리 및 정비 내용에 따라 개선된 성능에 대한 세부 효과 평가가 가능하고, 이는 피드백 되어 정책의 방향이 제시될 수 있다.

본 연구에서 제안된 회복탄력성 측정 방법 및 모델링 프레임워크는 해수면 상승 및 폭풍해일에 의한 연안침식 및

범람, 수온상승에 따른 어장재해 등 다른 연안재해에 있어 서도 충분히 확장 가능할 것으로 사료된다. 다만, 재해현상에 대한 최소 10년 이상의 관련 시계열 관측 데이터가 전제되어야 하며, 기후변화, 해수면상승, 해양산성화 등의 연안재해 가속화 요인을 충분히 고려하기 위해서는 최대한 촘촘한 데이터가 요구된다. 또한 추후 본 연구의 측정값 및 복합지수를 다양한 정책 변수와 연결하기 위해서는 본 연구에서 사용된 순서형 척도가 아닌 연속형 변수를 바탕으로 회복탄력성 성능 변화를 측정할 필요가 있다.

한편, 본 연구는 이론적 근거를 바탕으로 연안재해 회복탄력성에 대한 포괄적인 평가 프레임워크를 제시하였으나, 연안재해 원인에는 다양한 지역적 요인이 혼재되어 있으므로, 추후 지역적 특성을 고려한 측정 모형 개발이 필요할 것으로 보인다. 또한 지역별 연안재해 회복탄력성 평가 및 해석에 있어 모형에서 제시된 측정값과 함께 피해 복원을 위한 예산 투입 여부 등 다양한 정책 변수를 함께 활용한다면 더욱 정책 활용도가 높은 평가 결과가 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220431, 해양공간 정책시뮬레이터 기술개발).

References

- [1] Anjos, L. J. and P. M. de Toledo(2018), Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America, PLoS One, Vol. 13, No. 3, e0194654.
- [2] Birgani, Y. T. and F. Yazdandoost(2016), Resilience in urban drainage risk management systems, In proceedings of the institution of civil engineers-water management, Vol. 169, No. 1, pp. 3-16.
- [3] Bruneau, M., S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, ... and D. Von Winterfeldt(2003), A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, Earthquake spectra, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- [4] Chang, S. E. and M. Shinozuka(2004), Measuring improvements in the disaster resilience of communities, Earthquake spectra, Vol. 20, No. 3, pp. 739-755.
- [5] Chen, J., S. T. Yang, H. W. Li, B. Zhang, and J. R.

- Lv(2013), Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40, pp. 47-50.
- [6] Cutter, S. L., L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate, and J. Webb(2008), A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global environmental change*, Vol. 18, No. 4, pp. 598-606.
- [7] Cutter, S. L., K. D. Ash, and C. T. Emrich(2014), The geographies of community disaster resilience, *Global environmental change*, Vol. 29, pp. 65-77.
- [8] Field, C. B. and V. R. Barros(Eds.)(2014), *Climate change 2014 - Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*, Cambridge University Press.
- [9] Ingrisch, J. and M. Bahn(2018), Towards a comparable quantification of resilience, *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 33, No. 4, pp. 251-259.
- [10] Keating, A., K. Campbell, M. Szoenyi, C. McQuistan, D. Nash, and M. Burer(2017), Development and testing of a community flood resilience measurement tool, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-101.
- [11] Klein, R. J., R. J. Nicholls, and F. Thomalla(2003), Resilience to natural hazards: How useful is this concept?, *Global environmental change part B: environmental hazards*, Vol. 5, No. 1, pp. 35-45.
- [12] Kythreotis, A. P. and G. I. Bristow(2017), The 'resilience trap': exploring the practical utility of resilience for climate change adaptation in UK city-regions, *Regional Studies*, Vol. 51, No. 10, pp. 1530-1541.
- [13] Laboy, M. and D. Fannon(2016), Resilience theory and praxis: a critical framework for architecture, *Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research*, Vol. 13, No. 1.
- [14] McClymont, K., D. Morrison, L. Beevers, and E. Carmen (2020), Flood resilience: a systematic review. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 63, No. 7, pp. 1151-1176.
- [15] Manyena, B., G. O'Brien, P. O'Keefe, and J. Rose(2011), Disaster resilience: a bounce back or bounce forward ability?, *Local Environment: The International Journal of Justice and Sustainability*, Vol. 16, No. 5, pp. 417-424.
- [16] Míguez, M. G. and Veról, A. P.(2017), A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 44, No. 5, pp. 925-946.
- [17] Mugume, S. N., D. E. Gomez, G. Fu, R. Farmani, and D. Butler(2015), A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems, *Water research*, Vol. 81, pp. 15-26.
- [18] Owotoki, P., N. Manojlovic, F. Mayer-Lindenberg, and E. Pasche(2006), A data mining approach for capacity building of stakeholders in integrated flood management, In *Sixth International Conference on Data Mining (ICDM'06)*, pp. 446-455.
- [19] Qasim, S., M. Qasim, R. P. Shrestha, A. N. Khan, K. Tun, and M. Ashraf(2016), Community resilience to flood hazards in Khyber Pukhthunkhwa province of Pakistan, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 18, pp. 100-106.
- [20] Schinke, R., A. Kaidel, S. Golz, T. Naumann, J. S. López-Gutiérrez, and S. Garvin(2016), Analysing the effects of flood-resilience technologies in urban areas using a synthetic model approach, *ISPRS international journal of geo-information*, Vol. 5, No. 11, 202.
- [21] Simonovic, S. P. and A. Peck(2013), Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework, *British Journal of Environment and Climate Change*, Vol. 3, No. 3, pp. 378-401.
- [22] Simonovic, S. P.(2018), From risk management to quantitative disaster resilience: A new paradigm for catastrophe modeling, In *Risk modeling for hazards and disasters*, pp. 281-297.
- [23] Singh, R. R., M. Bruneau, A. Stavridis, and K. Sett(2022), Resilience deficit index for quantification of resilience, *Resilient Cities and Structures*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-9.
- [24] Timmermann, P.(1981), Vulnerability, resilience and the collapse of society, *Environmental Monograph*, Vol. 1, pp. 1-42.
- [25] Torresan, S., A. Critto, J. Rizzi, A. Zabeo, E. Furlan, and A. Marcomini(2016), DESYCO: A decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones, *Ocean & Coastal Management*, Vol. 120, pp. 49-63.
- [26] Toimil, A., I. J. Losada, R. J. Nicholls, R. A. Dalrymple, and M. J. Stive(2020), Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review, *Coastal Engineering*, Vol. 156, 103611.
- [27] Wong, P. P., I. J. Losada, J. P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. L. McInnes, ... and A. Sallenger(2014), Coastal systems and low-lying areas. *Climate change*, Vol. 2104, pp. 361-409.

- [28] Woodruff, S. C. and M. Stults(2016), Numerous strategies but limited implementation guidance in US local adaptation plans, *Nature Climate Change*, Vol. 6, No. 8, pp. 796-802.
- [29] Zevenbergen, C., B. Gersonius, and M. Radhakrishnan(2020), Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 378, No. 2168, 20190212.

Received : 2023. 11. 27.

Revised : 2023. 12. 14.

Accepted : 2023. 12. 29.