

기후변화를 고려한 연안역 보호 방법에 대한 고찰

Water
for future
학술/기술 기사
01



오상호
창원대학교
건설시스템공학과 교수
ohsangho@changwon.ac.kr

1. 들어가며

기후변화는 수십 년 이상 지속되는 기후 상태의 자연적 또는 인위적 변화를 의미한다. 기후변화가 현재 인간의 생활에 어떠한 영향을 미치고 있고, 앞으로 얼마나 더 가속화될 것인지에 대해서는 여전히 서로 다른 의견들이 존재하지만 기후가 추세적으로 변하고 있다는 점에 대해서는 논쟁의 여지가 거의 없다고 할 수 있다. 실제로 해수면 상승, 태풍의 강도 증가 등 지금까지 축적된 여러 해양 관측 데이터를 통해서도 이러한 사실들은 실증적으로 확인되고 있다. 우리나라만 하더라도 국립해양조사원의 조사 결과에 따르면 지난 33년(1989년~2021년) 동안 우리나라 주변 바다의 해수면 높이가 평균 9.9cm 상승하였다.

기후변화는 해안 지역에 광범위하면서도 매우 다층적인 영향을 미치게 된다. 고파랑 및 폭풍해일에 의한 연안 침수와 해안 침식이 가장 주요한 우려사항이며, 그 밖에도 표층수와 지하수에의 염분 침투, 해안 습지의 축소 및 소실, 연안 생태계의 급격한 변화 등이 발생할 수 있다(Nicholls et al., 2007). 이 중에서도 본 기사에서는 해안공학적인 관점에서 기후변화로 인해 종래의 연안역 보호방법이 가지게 되는 한계점 및 최근 논의가 활발하게 이루어지고 있는 자연기반의 연안역 보호방

법에 대해서 간략히 고찰해 보고자 한다.

2. 기후변화가 연안역 보호방법에 미치는 영향

기후변화는 필연적으로 미래의 불확실성을 증가시키며, 연안역을 이용하고 관리하는 데에도 중요하게 작용한다. Hallegatte(2009)는 표1에 제시된 것처럼 기후변화가 영향을 미치는 정도(노출도)를 몇 가지 부문별로 구분하여 제시한 바 있다. 이 표에서 시간 척도는 어떤 시설물이나 건물을 지을 때 고려하는 내구연한에 대응되며 기후변화의 노출도는 그 기간 동안 기후변화로 인한 영향에 노출되는 상대적인 정도를 의미한다. 제방이나 호안과 같은 해안 방재 시설물은 시간 척도는 다른 부문에 비해 길지 않은 편임에도 불구하고 기후변화에 대한 노출도는 매우 높은 편이다.

해수면 상승은 해안 지역에서의 가장 중요한 기후변화 인자로 고려되고 있으며 상대적으로 관측 및 향후의 장기 추세 예측이 용이한 편이다. 그래서 이미 부분적으로는 해안 구조물 건설 시 내구연한 기간 동안의 수위 상승량을 고려하고 있다. 반면에 파랑과 폭풍 해일의 경우 기왕의 관측자료에 기반한 수치모델링에 근거해서 추산하고 있으며 기후변화의 영향은 실질적으로 무시되고 있다. 그 이유는 기후 변화가 향후 30년 또는 50년 후의

파랑과 폭풍해일의 크기에 미치는 영향에 대한 지식이 불완전하여 계산 결과의 불확실성이 크기 때문이다. 미래 기후를 예측하는 전지구 모델 또는 지역 모델 등의 정확도는 여전히 개선의 여지가 많고 이러한 모델들로부터 추산된 파랑 및 폭풍해일의 미래 전망값은 하나의 참고자료로서만 받아들여지고 있는 실정이다. 실제로 해수면 높이와 파랑, 폭풍해일 간의 비선형 상호 작용은 매우 복잡할 뿐 아니라 지역적으로 다르게 나타나기 때문에 이러한 영향을 어떻게 설계 변수에 반영할 지에 대해서는 아직까지 선행 연구가 많지 않다.

한편, 기후변화는 항만 및 해안 구조물을 설계하고 유지관리하는 기준 및 지침에도 변화를 요구하게 된다. 기후변화로 인해 구조물 건설 시 가정했던 조건을 초월하는 외력이 구조물에 작용할 수 있기 때문이다. 이러한 기후변화의 영향을 고려하기 위해서는 기왕의 결정론적 설계법으로는 명백한 한계점이 존재하므로 확률론적 설계법을 도입하여 기후변화로 인한 설계 상의 불확실성에 대한 정량적 평가가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 장기간의 시간 이력에 따른 하중 강도의 평균 및 극한값의 변화 및 이에 따른 시설물 내구성 평가 기준 등을 통계적 기법으로 분석하여 정립할 필요가 있다. 예를 들어 경사식 방파제의 소파블록 안정성을 평가할 때 종래에는 하나의 단일 태풍이 구조물에 영향을 미치는 몇 시간 또는 며칠 동안

표1. 주요 부문별 기후변화의 노출도 (Hallegatte, 2009)

	시간 척도 (년)	기후변화 노출도
수자원 시설물	30-200	+++
교통 시설물	30-200	+
건물 및 주택	30-150	++
해안 방재 시설물	>50	+++
에너지 생산시설물	20-70	+

의 피해율만을 고려했다면 앞으로는 구조물의 전체 내구연한 동안 누적되는 피해 양상을 포괄적으로 평가하는 방법론이 제시될 필요가 있다. 즉, 기후변화에 따른 설계 외력의 시간적 변화 추세를 고려하여 특정 구조물의 생애주기 동안의 안정성을 신뢰성 기반으로 평가하는 기법이 마련되어야 할 것이다.

3. 자연기반의 연안역 보호방법

기후변화에 대한 대응책으로는 후퇴, 수용, 보호 및 전진(해상 건설)등이 거론되며, 국가 또는 지역별로 처한 상황에 따라 취할 수 있는 전략이 다르겠지만 통상적으로 보호 전략이 가장 선호된다.

연안재해와 침식에 대응하기 위한 전통적인 연안역의 보호 방법은 호안이나 제방을 쌓는 것이었다. 경성 보호(hard protection) 공법으로 일컬어지는 이러한 방법은 해안선을 유지하는 데에는 효과적이지만 배후의 육지를 수력 작용으로부터 보호하는 데에만 초점을 두기 때문에 연안 환경에 영향을 미치고, 그로 인해 퇴적물의 이동은 물론 생태계 변화를 초래하게 된다. 또한 기후변화로 인해 증가하는 위험에 대응하기 위해 지속적으로 구조물의 마루 높이를 높이거나 공간적 범위를 확장하는 등 유지관리를 실시하는데 상당한 비용이 든다.

이러한 문제점에 대한 인식으로부터 최근에는 생태계와 자연 방어력에 대한 가치를 더 중요하게 평가하는 자연기반해법(Nature Based Solution:NBS)에 대한 관심이 높아지고 있다. 자연기반해법은 자연과 생태계를 보호하고 지속적으로 관리 및 복원하며 인간 삶의 질과 생태적 다양성을 확보하는 활동으로 정의된다. 유엔환경계획

(UNEP)에서 발간된 보고서 “State of Finance for Nature”에 따르면 2020년 자연기반해법에 대한 투자는 전 세계적으로 약 170조원(1,330억 달러) 규모였으며, 2030년까지 3배 이상 그 규모가 증가할 전망이다. 현재 대부분의 투자는 생태다양성 확보, 경관 보호, 삼림 복원, 이탄지 복원, 재생 농업, 수자원 보호 및 오염 통제 등에 사용되고 있다.

아직까지 자연기반해법이 전통적인 방법보다 해안 지역을 보호하는데 더 좋다고 주장하기는 어렵지만 기후변화에 보다 유연하게 대응할 수 있다는 점은 확실하다. 염생 습지(salt marsh) 및 모래 언덕(sand dune) 등은 자연기반해법에 의해 구조적 방어의 역할을 줄이면서 연안 범람의 위험을 줄이는 사례이다. 실제로 식생된 갯벌이 파도의 영향과 범람에 대한 제방 파괴 확률을 감소시킬 수 있다는 연구 결과가 있다 (Vuik et al., 2018). 또 다른 사례로 네덜란드 해안에서 최근 진행된 대규모 양빈사업인 Sand Motor의 경우 막대한 양의 모래를 한꺼번에 투입하여 상당한 기간에 걸쳐서 자연적인 변화를 거치는 과정에서 넓은 범위에 걸친 해안선의 안정화 및 생태계 보전을 꾀하고 있으며 소규모 양빈을 반복하는 것보다 효과적인 것으로 알려져 있다.

그러나 자연기반해법을 적용하기 위해서는 상당히 넓은 공간을 필요로 하며 그렇기 때문에 이미 도시화가 진행된 해안 도시의 경우에는 이 기법을 적용하는 것이 현실적으로 매우 어렵다. 무엇보다도 자연기반해법은 기존의 경성 보호공법처럼 확실한 보호 기준 또는 지침을 수립하는 것이 애매할 수 있다. 또한 자연기반해법을 적용할 경우 확보할 수 있는 내구연한을 정의하는 데에도 불확실성이 존재한다.

이러한 불확실성을 포함하여 기후변화에 대



그림 1. 네덜란드 와덴 해(Wadden Sea) 연안에 조성된 염생 습지 (Vuik et al., 2018)



그림 2. Sand Motor 사업 직후인 2011년 7월과 2016년 1월에 촬영된 사진 (Deltares)

응하는 방법 중 하나는 적응 경로(adaptation pathway)를 설정하는 것이다. 영국 런던의 경우 지속적인 해수면 상승에 대비하기 위해 Thames Estuary 2100 프로젝트를 수립하고, 해수면이 상승하는 주요 단계별로 그에 보조를 맞춰 적응할 시기와 방법을 결정하는 전략을 취하고 있다. 즉, 시간이 경과하면서 나타나는 기후변화의 양상을 모니터링하면서 수용 가능한 위험 수준별로 미리

설정된 적응 목표에 따라 대응 전략을 구체화하는 것이다. 이러한 접근법은 합리적이긴 하지만 적절한 임계점을 식별하기 위한 지표를 설정하거나 사회적 합의를 통해 허용 가능한 위험 수준을 정의하는 데 여전히 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 극복하기 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있으므로 향후 보다 진전된 지식과 실현 가능성이 더 높은 해법을 제시하게 될 것으로 전망된다.

4. 맺음말

기후변화에 대비하여 연안역을 효과적으로 보호하는 방법을 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 기후변화가 장기간에 걸쳐서 일어나며 그에 따른 해양 물리, 생태 환경의 변화와 우리의 인식도 지속적으로 바뀌기 때문이다. 그렇기 때문에 기후변화에 대응하는 전략은 유연할 필요가 있다.

우리나라의 경우 전통적인 결정론적 설계법에서 확률론적 기반의 성능설계법으로의 전환도 아직 완전하지 않기 때문에 자연기반해법을 비롯한

비구조적 보호방법에 대해서는 관심이 매우 낮은 편이다. 그렇지만 기후변화라는 추세 자체가 바뀌지 않는 한 이에 효과적으로 대응하기 위한 적응 전략에 대한 고민은 지속적으로 이루어져야만 한다. 여기에는 일반 시민들의 인식 전환과 국가 재정의 투자 등 사회경제적 가치의 변화도 수반되어야 할 것이다. 따라서 기술적인 진보를 이루어냄과 동시에 이러한 비구조적 보호방법을 점진적으로 도입하기 위한 의사결정 과정에 수공학 분야 전문가들이 적극적으로 참여하는 노력도 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global environmental change*, 19(2), 240-247.
- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S., Woodroffe, C. D., Abuodha, P. A. O., Arblaster, J., Brown, B., Forbes, D., Hall, J., Kovats, S., Lowe, J., McInnes, K., Moser, S., Rupp-Armstrong, S., and Saito, Y. (2007). Coastal systems and low-lying areas.
- Vuik, V., Van Vuren, S., Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., & Jonkman, S. N. (2018). Assessing safety of nature-based flood defenses: Dealing with extremes and uncertainties. *Coastal engineering*, 139, 47-64.