SFO Science of Fisheries & Oceanography
ISSN 2734-1011 (Print)
ISSN 2671-4310 (Online)
Vol. 33, No. 2, pp. 99-110 (2024)
https://doi.org/10.22714/SFO.2024.33.2.5

Original Research Article

해양 식생 굽힘 높이의 근사 추정: 유동장에서 압력장으로의 변환

Approximate Estimation of Marine Vegetation Bending Height: Transformation from the Water Flow Field to the Pressure Field

탄 반 차우[1], 나원배[1,*]
Than Van Chau[1], Won-Bae Na[1,*]

[1]부경대학교 해양공학과
[1]Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

* Correspondence to Won-Bae Na
E-mail: wna@pknu.ac.kr

Received January 27, 2025
Revised February 21, 2025
Accepted February 24, 2025

Abstract : Today, we consider the marine vegetation as a living shoreline that protects the coastal community and ecosystem from the damage caused by wave energy. This is because marine vegetation meadows slow the waves and act as a natural barrier to reduce the wave heights and energies. Thus, it is necessary to study the motion (bending and swaying) of marine vegetation for constructing living shorelines. To provide an alternative approach to estimating the bending behavior of marine vegetation, we calculated the bending height of marine vegetation by transforming the flow field into a pressure field. We modeled six vegetation as a cantilever beam, obtained their maximum transverse displacements, and compared the results with ones of the fluid-structure interaction numerical simulation. The relative % error between these two results is 2.74~12.48%. Thus, it is shown that the beam bending model (cantilever beam, linear elasticity) simulates the transverse displacement relatively accurately. The maximum transverse displacements were less than 14 cm, which is 4.7~39.9% of the vegetation heights (25, 30, 35 cm). Moreover, a significant positive linear relationship ($R^2 = 0.97$ or 0.96) was established between the maximum transverse displacements and the two parameters proposed in this study. This indicates that the bending height of the vegetation depends on the flow velocity, height, width, thickness, and Young's modulus of the vegetation, highlighting the proposed method can predict the bending behavior (the maximum transverse displacement) of the vegetation in the pressure field to some extent. In this respect, this study not only provides an alternative approach for the bending height estimation but also further strengthens the suitability of the multi-regression equation developed in the flow field.

Keywords : Marine vegetation, Bending height, Flow field, Pressure field, Living shorelines

서 론

해양에서 순 일차 생산(NPP; net primary production)의 시공간적 분포는 빛, 영양염류, 수온에 의해 제한되며, 물은 육지에서의 순 일차 생산에도 중요하다(Sigman and Hain, 2012). 바다의 수온 변화는 육지보다 작은데 이는 해수 열용량(heat capacity)의 수온 변화 완충 효과, 대기와 해양의 순환, 그리고 해빙(sea ice)의 단열 기능 때문이다. 따라서 빛과 무기 영양염류의 가용성이 해양 일차 생산에서 중요한 역할을 한다(Mora *et al.*, 2013). 해양 일차 생산(primary production)의 대부분을 담당하는 조류(algae)와 남조류(cyanobacteria)는 지구 산소의 절반을 생산하고, 거의 모든 해양 동물 생명을 지원한다(Falkowski, 2012).

기후 모델(climate model)이 채택한 온실가스 배출 시나리오에 따르면 해양의 생지화학적(biogeochemical) 변화는 해양 NPP를 3~10% 감소시킬 수 있다(Duffy *et al.*, 2019). 따라서, 최근 해양과 대기에 미치는 긍정적인 영향(1차 생산의 증가 등 Fig. 1)으로 인해 바다숲(marine forests)에 관한 관심이

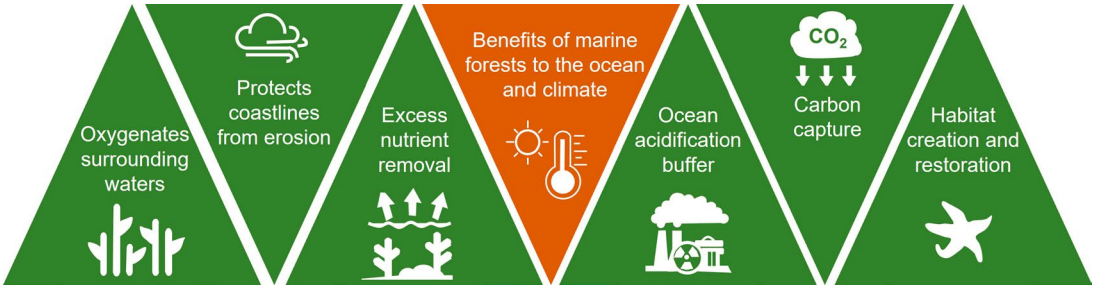

Fig. 1. Marine forest's impact on the ocean and atmosphere.

높아지고 있으며(Lang-wong *et al.*, 2022), 이를 증가하는 방안으로 바다숲 조성(ocean afforestation)의 역할이 더욱 강조되고 있다. 여기서 바다숲은 일반적으로 대형 조류(macroalgae) 서식지와 식생(vegetation)이 있는 해안 서식지(예: 해초, 조수 습지, 맹그로브)를 지칭한다. 그러나 특정 맥락에서 바다숲은 대형 조류가 만든 3차원 저서 해양 경관으로 한정될 수 있으며(Duffy *et al.*, 2019; Wernberg and Filbee-Dexter, 2019; Lee *et al.*, 2020), 대부분 연구자는 바다숲 조성이 대형 조류 숲 조성을 포함한다고 믿는다(예: N'Yeurt *et al.*, 2012; Bach *et al.*, 2021).

지난 수십 년 동안 기후 변화가 해안 및 육상 식생(vegetation)에 미치는 영향을 조사하는 연구가 수행되었다. 이러한 연구는 환경 변화(예: 수온)가 식생 피복과 분포에 어떤 영향을 미치는지 더 잘 이해하기 위해 수행되었다(He and Lee, 2016; Oilver *et al.*, 2018; Ghaderpour *et al.*, 2020; Jung *et al.*, 2022; Chau *et al.*, 2024). 또한, 해양 식생(예: 해초, 해조류, 맹그로브, 염습지)이 수생 환경에 미치는 영향을 탐구하기 위한 상당한 노력이 이루어졌다.

대표적인 연구로 유체 흐름 특성과 영양염류, 오염물질, 퇴적물 이동에 미치는 해양 식생의 역할 규명을 들 수 있다(Clarke, 2002; Wang *et al.*, 2014; Toromanovic *et al.*, 2018; Box *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2021; Bai *et al.*, 2022; Barahimi and Sui, 2023; Stocker *et al.*, 2023). 연구자들은 다양한 도구와 기술을 사용하여 해양 식생과 유체 흐름 간의 복잡한 상호작용을 탐구하여 식생 기반 생태계가 제공하는 생태·환경적 이점에 대한 통찰력을 얻었다. 오늘날 이와 같은 연구는 바다와 해안역의 건강을 보호·보존하는 측면에서 그 중요성이 증가하고 있다.

파도(wave)는 해안에 접근함에 따라 높이가 증가하는 경향이 있어 해안 서식지와 구조물에 침식 및 다양한 피해를 유발한다. 해양 식생 초원은 파도를 늦추고, 파의 높이와 에너지를 줄이는 자연 장벽 역할을 한다(John *et al.*, 2015; Morris *et al.*, 2020). 즉, 다수의 해양 식생은 바닥에 뿌리를 내려 퇴적물을 안정화하고, 강한 흐름이나 폭풍으로부터 퇴적물이 덜 씻겨 내려가는 역할을 한다(Sánchez-González *et al.*, 2011; Sigren *et al.*, 2014). 해안 침식을 방지하는 자연 장벽은 해양 생물에게 서식지를 제공하는 역할도 한다. 오늘날 우리는 해양 식생을 파랑 에너지가 초래하는 피해로부터 해안 지역사회와 생태계를 보호하는 살아있는 해안선(리빙 쇼라인; living shoreline)으로 간주하고 있다(Morris *et al.*, 2020; Manousakas *et al.*, 2022).

예를 들어, 델라웨어 '리빙 쇼라인 위원회' (Delaware living shoreline committee, 2024)는 '리빙 쇼라인'이 침식으로부터 해안선을 안정화할 수 있다고 강조하고 있다. 또한, 경화된 구조물(hardened structure)과 달리 '리빙 쇼라인'은 인간과 동식물에 많은 이점을 제공한다. 여기에는 물 정화(cleaning water), 생물(물고기, 새 등)의 서식지 개선, 시민에게 즐거운 미적 감각 제공이 포함된다. 이처럼 살아있는 해안선은 자연을 모방하여 작동하며 주변 조건에 따라 변화하거나 적응할 수 있어 해안선 관리를 위한 지속 가능한 방안이 되고 있다. 반면 경성공법으로 조성한 '단단한' 해안구조물은 계절, 날씨 또는 기타 조건에 따라 변화하거나 움직일 수 없으며 종종 침식, 구조적 손상 등을 유발한다. 따라서 '리빙 쇼라인'의 장점은 아래와 같이 요약될 수 있다(NOAA, 2024). 첫째, '리빙 쇼라인'은 동식물에 중요한 해안 서식지를 제공한다. 둘째, '리빙 쇼라인'은 퇴적물과 오염물질을 가두어 수질을 개선한다. 셋째, 해안선을 따라 위치한 식생은 파도를 자연스럽게 늦추고 침식과 재산의 손상을 방지하거나 완화한다. 또한, '리빙 쇼라인'은 육지와 물을 연결하기 때문에 변화하는 조건에 적응하고 해수면이 상승함에 따라 내륙으로 이동할 수 있다. 넷째, '리빙 쇼라인'은 거주 및 유휴공간을 미적으로 더 좋게 만들고, 시민이 여가 활동을 영위할 수 있도록 접근성을 향상한다. 다섯째, '리빙 쇼라인'은 환경친화적인 공간을 조성하여 시민에게 정서적인 안정감을 제공하고, 지역공동체에 해안선을 보호한다는 자부심을 고취한다.

해양 식생이 파고와 파랑 에너지를 어떻게 감소시키는지 알아보기 위해 실험실 규모 및 현장 실험, 수치 시뮬레이션(numerical simulation) 및 이론적 연구가 수행되었다(Fonseca and Cahalan, 1992; Augustin *et al.*, 2009; Stratigaki *et al.*, 2011; Koftis *et al.*, 2013; Yiping *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2016; Nowacki *et al.*, 2017; Twomey *et al.*, 2020; Paquier *et al.*, 2021; Yin

et al., 2021). 이들 연구는 실제 식생을 실험에 적용하는 한계로 인해 특정한 식생만을 고려하였거나(John *et al.*, 2015; Yiping *et al.*, 2015), 식생의 유연성(flexibility)을 무시하고 완전히 딱딱한(rigid) 고체로 간주하여 실험 및 해석을 수행하였다(Hashim and Catherine, 2013; He *et al.*, 2019; Twomey *et al.*, 2020). 여기서 딱딱한 식생과 유연한 식생의 구분은 식생의 거동에 있다. 유연한 식생은 물 흐름에 반응하여 구부러지고 흔들릴 수 있지만, 딱딱한 식생은 원래 자세를 유지하는 경향이 있다.

이처럼 다양한 연구에서 식생의 움직임을 탐구하여 식생의 항력을 계산하고, 식생의 움직임(굽힘, 흔들림)이 식생 초원(meadow) 내에서 파동 감쇠에 상당한 영향을 미치는 것을 검증하였다(Fonseca and Kenworthy, 1987; Luhar and Nepf, 2011; Zeller *et al.*, 2014; Losada *et al.*, 2016). 하지만, 유연한 식생이 파고를 어떻게 줄이는지 정량화하려면 더욱 다양한 방법을 개발하고 적용할 필요가 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 하나의 방편으로 광범위한 적용성이 있고 상대적으로 비용이 저렴한 수치 시뮬레이션이나 현상의 복잡성을 해결하기 위한 경험적인 다중 회귀 방정식(multi-regression equation)이 개발되었다(Chau *et al.*, 2024). 해당 연구에서는 물 흐름(water flow)에서 유연한 해양 식생의 굽힘 거동과 높이 감소를 추정하였고, 하류(downstream) 식생 초원에서 파고 감소를 예측하였다. 해당 접근 방식은 원래 높이(즉, 식생 높이)가 아닌 감소한 식생 높이(즉, 굽힘 높이)를 고려함으로 식생의 움직임(굽힘)이 파고 감소에 어떤 영향을 미치는지 더욱 명확하게 고찰할 수 있게 한다. 이를 위해 수행된 연구 방법은 다음과 같이 요약된다. 첫째, 실험실에서 입자 영상 유속계(PIV; particle image velocimetry)를 사용하여 굽힘 높이를 측정했다. 둘째, ANSYS Fluent 소프트웨어 패키지(ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA)를 사용하여 유체-구조 상호작용(FSI; fluid-structure interaction) 수치 시뮬레이션을 수행하여 획득한 수치 결과와 실험에서 측정된 결과를 비교하였다. 셋째, 획득한 데이터를 기반으로 식생의 굽힘 높이를 산출하는 다중 회귀 방정식을 구축하였다. 넷째, 다중 회귀 방정식으로부터 추출된 데이터(굽힘 높이)를 사용하여 식생에 의한 하류 파고 감소를 도출하고, 그 결과를 식생 높이를 사용하여 얻은 결과와 비교하였다.

본 연구는 식생 굽힘이 파동 감쇠에 미치는 영향을 평가하는 간소화된 방법론을 제시하고자 수행되었다. 이를 위한 더욱 구체적인 연구 질문은 "유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션(Chau *et al.*, 2024)에서 예측된 굽힘 거동이 구조형식의 하나인 보(beam)의 횡 방향 거동(변위)으로 모사될 수 있을까?"로 설정되었다. 연구 질문에 답하기 위해 수행된 연구 내용은 아래와 같다. 첫째, 구조해석 관점에서 식생을 외팔보(cantilever beam)로 모형화하고, 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션에서 획득된 압력(pressure)을 외팔보에 작용시켜 식생의 굽힘 거동을 분석하였다. 둘째, 예측된 식생의 최대 횡 방향 변위를 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 결과와 비교하여 구조해석 수치 시뮬레이션의 정확성을 검증하였다. 셋째, 압력장을 활용하여 획득한 외팔보의 최대 횡 방향 변위와 유동장을 활용하여 획득한 식생의 굽힘 높이와의 상관관계를 분석하였다. 연구 결과는 궁극적으로 식생을 이용하여 구축되는 리빙 쇼라인에 활용될 수 있으며, 이를 위해 잘피(seagrass)와 같은 식생이 서식하는 수심 4~5 m(예: 우리나라 남서부 연안) 해역을 고려할 수 있다(Hong and Lee, 2022).

본 연구의 학술적인 기여는 다음과 같이 요약된다. 첫째, 본 연구는 물 흐름에서 유연한 식생의 굽힘 거동을 외팔보 모형으로 추정하였다. 둘째, 기존 연구에서 제안된 다중 회귀 방정식의 적합성을 구조해석 관점에서 확장하였다. 셋째, 유동장에서 식생의 굽힘 높이와 압력장에서의 외팔보의 최대 횡 방향 변위와의 상관성을 검증하였다. 본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 단일 유형의 식생만 고려하였고, 물 흐름으로 인해 모든 식생 줄기(stem)가 같은 수준으로 굽혀진다고 가정하였다. 둘째, 유체-구조 상호작용 시뮬레이션에서 물 흐름의 속도는 균일하고 시간에 독립적이라 가정하고, 식생에 작용하는 압력을 추출하였다. 즉, 물 흐름의 속도가 일정하게 유지된 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 셋째, 식생은 물 흐름으로 인해 굽혀지고(bending) 흔들리지만(swaying), 본 연구에서는 굽힘에만 초점을 맞추었다. 넷째, 구조해석에서 외팔보의 기하학적, 재료학적 비선형성은 고려되지 않았다. 즉, 구조해석은 선형탄성 영역에서 수행되었다.

재료 및 방법

해양 식생을 이용하여 파고의 저감을 추정한 연구에서 고려한 식생의 높이(0.07~0.55 m), 너비(1.8~38.1 mm), 탄성계수(0.56~3530±390 MPa)는 매우 다양하다(Folkard, 2005; Augustin *et al.*, 2009; Stratigaki *et al.*, 2011; Paul *et al.*, 2012; Kotfis *et al.*, 2013; John *et al.*, 2015; Weitzman *et al.*, 2015; He *et al.*, 2019; van Veelen *et al.*, 2020). 사용된 대체(또는 인공) 재료도 다양한데, 이는 폴리에틸렌(polyethylene), 목재 장부촉(wooden dowel), 폴리프로필렌(Polypropylene), 케이블타이 폴리 리본(cable ties poly ribon), 폴리염화비닐(PVC), 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 대나무 장부촉(bamboo dowel), 실리콘 실란트(silicone sealant) 등을 포함한다. 본 연구에서는 기존 연구(Chau *et al.*, 2024)가 흐름장에서 실제 식생의 행동을 시뮬레이션하기 위해 사용한 스타이렌(styrene; 방향족 탄화수소) 단량체의 합성 중합체인 얇은 폴리스타이렌(polystyrene)을 고려

하였다. 해당 재료의 특성은 Table 1과 같다.

'오일러-베르누이 보 이론(Euler-Bernoulli beam theory)'에서 보의 굽힘 거동에 영향을 미치는 보의 특성은 재료학적 특성과 기하학적 특성으로 분류할 수 있다. 재료학적 특성은 보의 탄성계수(Young's modulus, E)를 뜻하며, 기하학적 특성은 보의 길이(length, L), 중립축(neutral axis)에 관한 단면 이차모멘트(second moment of area, I)를 뜻한다. 본 연구에서는 보의 굽힘 거동이 선형탄성 거동이라고 가정하였다. 이는 식생의 굽힘 거동 해석에서 기하학적 비선형성뿐만 아니라 재료학적 비선형성도 배제한다는 뜻이다. 본 연구에서는 식생의 재료학적 특성(Table 1)을 반영하여 기존 연구(Chau *et al.*, 2024)의 1단계 27개 수치 시뮬레이션 시나리오 중 대표적인 6개 시나리오(S1~S6)를 Table 2와 같이 고려하였다. Table 2에서 단면 이차모멘트는 중립축에 관한 것으로 직사각형 단면(폭 W, 두께 T)을 고려하면 $WT^3/12$로 표현된다.

식생을 굽혀지는 구조형식의 하나인 보(beam)로, 식생 하단을 경계 조건의 하나인 고정단(fixed end)으로 가정하면 해당 모델은 외팔보가 되고, 유동장에서 식생의 굽힘 거동은 압력장에서 외팔보의 굽힘 거동으로 변환된다. 즉, 유체-구조 상호작용 시뮬레이션이 구조해석 수치 시뮬레이션으로 단순화된다. 따라서 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션으로 획득한 식생 상단의 횡 방향 변위와 구조해석 수치 시뮬레이션에서 획득한 외팔보 자유단(free end)의 횡 방향 변위를 비교함으로써 기존 연구(Chau *et al.*, 2024)에서 제안한 다중 회귀 방정식의 적합성을 검증할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션으로부터 식생에 작용하는 압력을 Fig. 2와 같이 식생의 전면 후면에서 두 가지 방향(종 방향 Line 1, 횡 방향 Line 2)으로 획득하였다.

Fig. 3은 식생의 전면과 후면 각각에서 획득한 종 방향(Line 1)과 횡 방향(Line 2) 압력 분포의 예시를 나타낸다. 구조해석의 용이성을 위해서 식생의 전면과 후면에 작용하는 압력 분포로부터 평균압력을 계산하였다. 전면 평균압력의 계산 절차는 다음과 같다. 첫째, Line 2에서 전면 압력의 평균(p_2)과 최대 압력(p_{max})의 비율인 p_2/p_{max}를 구한다. 둘째, Line 1에서 전면 압력의 평균(p_1)을 구한 후, 이를 p_2/p_{max}와 곱하여 전면 평균압력 $p_1 \times p_2/p_{max}$를 구한다. 후면 평균압력도 위와 같은 방법으로 계산하였다. Fig. 4는 6개 시나리오에 대한 실제 압력 분포를 나타내며 상기 방법을 이용하여 전면 및 후면 평균압력을 구하면 Table 3과 같다.

본 연구에서는 외팔보 전면 및 후면에 작용하는 평균압력(Table 3)을 구조해석의 작용력으로 정의하였다. 식생의 유연성을 고려할 때 작용력에 따른 식생의 과도변위가 발생할 수 있고, 이는 해의 발산 문제를 초래할 수 있으므로 작용력을 단계적으로 증가시키는 과도 동적 해석(transient structural analysis)을 수행하였다. 이를 위해 하중을 총 10초(total time)에 걸쳐 0.05초 간격(time step)으로 증대하여 작용시켰다. 이후 정적 구조해석을 따로 수행하여 과도 동적 해석과 비교하였으며, 결과적으로 해의 발산 문제는 발생하지 않았고, 해석 결과가 정적 구조해석 결과에 수렴함을 확인하였다. 이는 보의 횡 방향 처짐이 과도하지 않아 기하학적인 비선형 해석이 필요하지 않음을 뜻한다.

과도 동적 구조해석에 사용된 소프트웨어 패키지는 'ANSYS Transient Structural'이다. 본 연구에서 고려한 식생의 전반적인 모형이 단순하고 복잡하지 않으므로 사면체(tetrahedron)보다 요소 수가 적더라도 더 정확한 결과를 제공하는 육면체

Table 1. Material properties of polystyrene

Property	Magnitude	Unit
Mass density	1040	kg m^{-3}
Coefficient of thermal expansion	0.00016	°C^{-1}
Young's modulus	2.73×10^9	Pa
Poisson's ratio	0.395	–
Bulk modulus	4.33×10^9	Pa
Shear modulus	9.78×10^8	Pa
Tensile yield strength	3.45×10^7	Pa
Tensile ultimate strength	4.31×10^7	Pa

Table 2. Structural analysis simulation scenarios for estimating beam bending behavior

Scenarios	Size			Young's modulus (Pa)	2nd moment of area§ (m^4)
	Length, L (m)	Width, W (m)	Thickness, T (m)		
S1	0.25	0.010	0.001	2.73×10^9	0.83×10^{-12}
S2	0.35	0.015	0.001	2.73×10^9	1.25×10^{-12}
S3	0.30	0.020	0.001	2.73×10^9	1.67×10^{-12}
S4	0.30	0.010	0.001	2.73×10^9	0.83×10^{-12}
S5	0.30	0.015	0.001	2.73×10^9	1.25×10^{-12}
S6	0.35	0.010	0.001	2.73×10^9	0.83×10^{-12}

§with respect to the neutral axis.

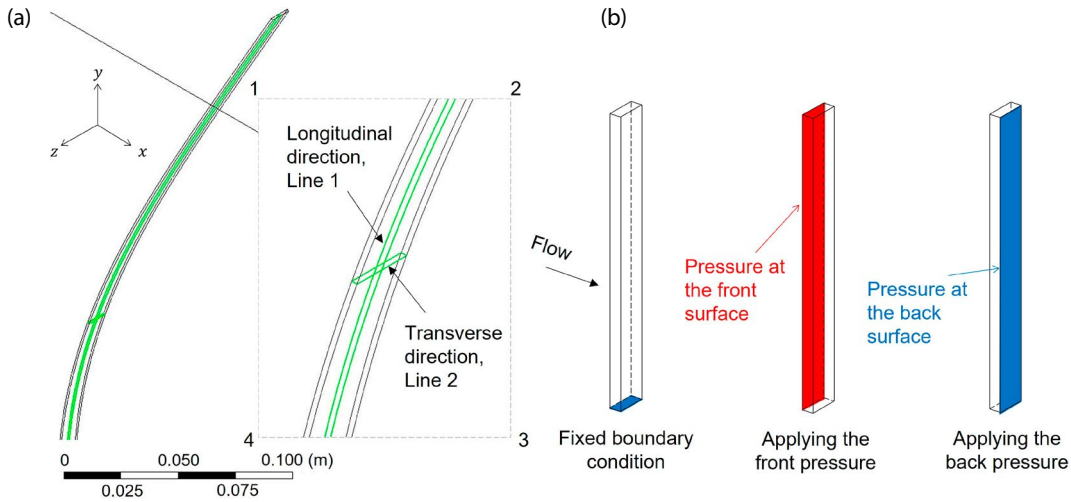

Fig. 2. Water pressure on the vegetation: (a) two pressure lines (longitudinal direction, i.e., Line 1; transverse direction, i.e., Line 2) for extracting the pressure, (b) model of this vegetation (cantilever beam) and bottom boundary condition (fixed end), definition of pressure acting on the front surface and back surface.

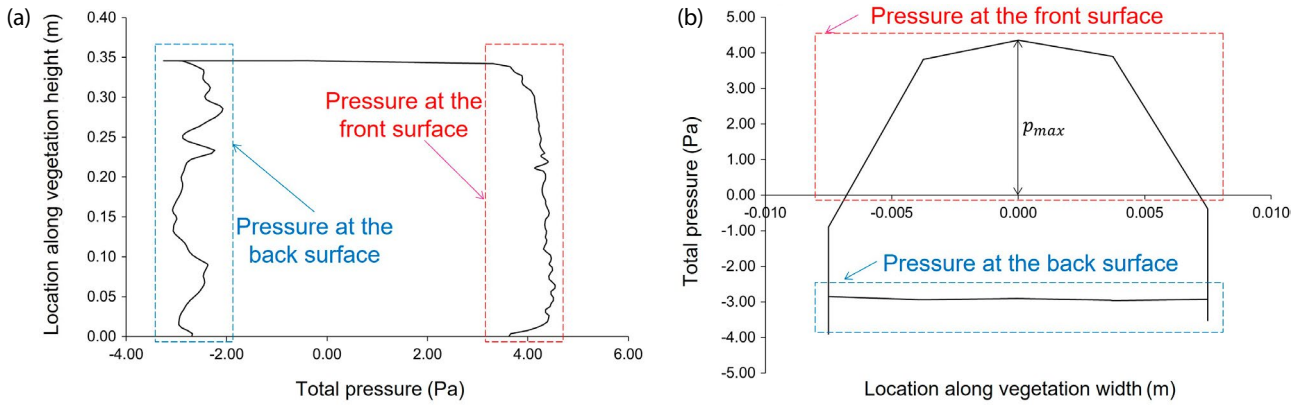

Fig. 3. Illustration of longitudinal and transverse pressure distributions acting on the front and back surface of vegetation: (a) longitudinal pressure distribution (Line 1) and (b) transverse pressure distribution (Line 2).

Table 3. Average pressures acting on the front and back surfaces

Scenarios	Pressure acting on front surface (Pa)	Pressure acting on back surface (Pa)
S1	3.31	−2.24
S2	3.91	−2.63
S3	5.70	−4.69
S4	7.03	−4.61
S5	10.80	−7.47
S6	9.00	−8.93

(hexahedron) 요소를 해석에 사용하였다(ANSYS Inc., 2020). 이를 명확하게 점검하기 위해 Table 4와 같이 6개 시나리오 모델의 요소(element)와 절점(node)을 구축하고, 메시(mesh)의 품질을 확인하였다. 모든 시나리오 모델에서 메시 품질, 즉 비대칭(skewness)과 직교 품질(orthognal quality)이 우수한(excellent) 것으로 확인되었다. Table 4에서 시나리오 모델별로 요소와 절점 수가 다른 이유는 각 모델의 높이(L)와 폭(W)이 다르기 때문이다.

결 과

식생을 외팔보로 모형화하여 획득한 굽힘 거동의 예시(S1)는 Fig. 5와 같다. Fig. 5a는 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션으로 획득한 굽힘 거동이며, Fig. 5b는 구조해석 수치 시뮬레이션으로 획득한 굽힘 거동이다. 여기서 자유단에서 변위

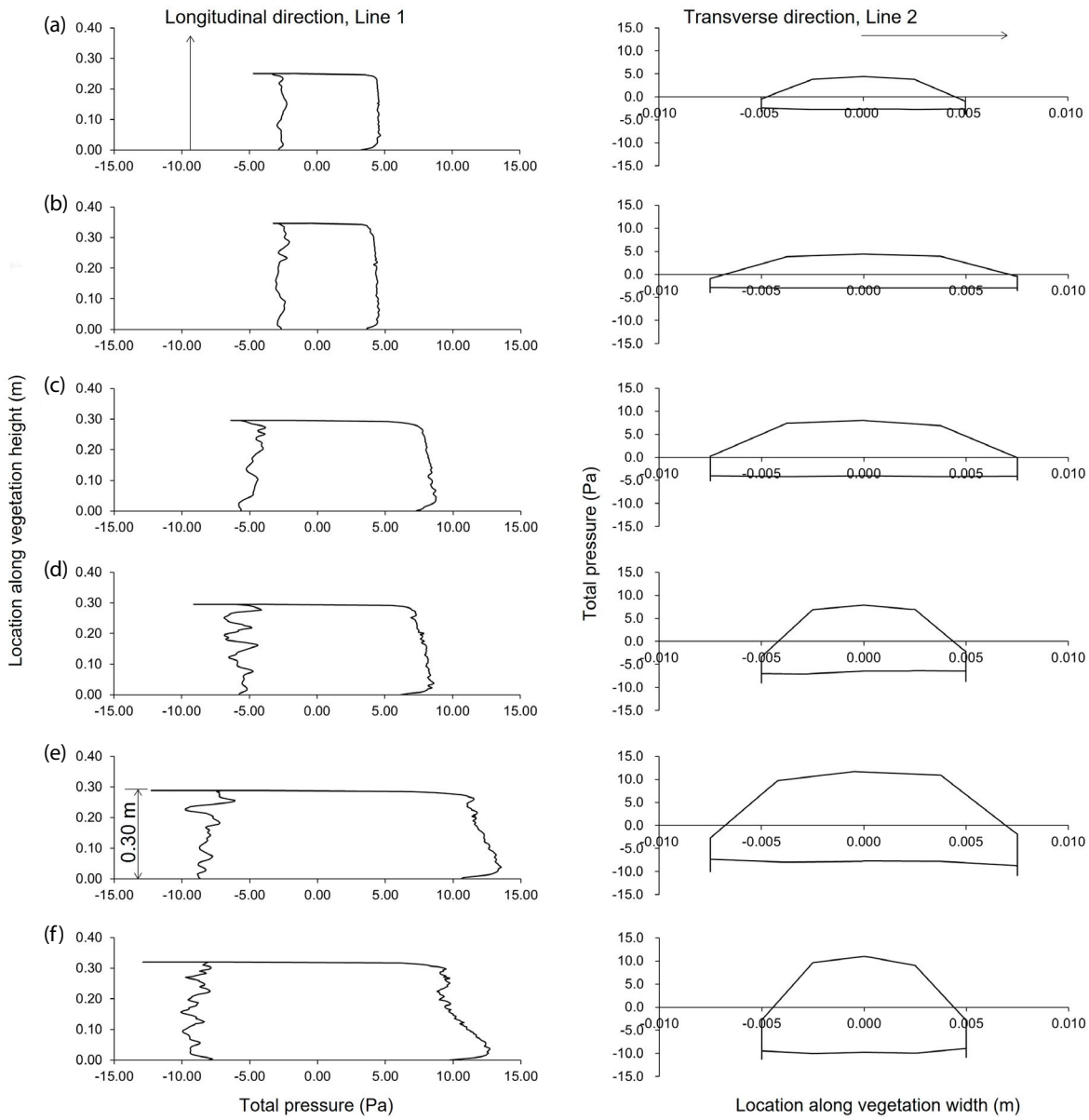

Fig. 4. Longitudinal and transverse pressures acting on vegetation: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, and (f) S6.

Table 4. Mesh properties and quality check

Scenarios	Number of nodes	Number of elements	Skewness[a]		Orthogonal quality[b]	
			Value	Quality	Value	Quality
S1	18803	2500	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent
S2	38578	5250	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent
S3	43603	6000	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent
S4	22553	3000	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent
S5	33078	4500	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent
S6	26303	3500	1.31×10^{-10}	Excellent	1.00	Excellent

[a]Skewness standard: excellent (0~0.25), very good (0.25~0.50), good (0.50~0.80), acceptable (0.80~0.94), bad (0.95~0.97), and unacceptable (0.98~1.00).
[b]Orthogonal standard: excellent (0.95~1.00), very good (0.70~0.95), good (0.20~0.69), acceptable (0.15~0.20), bad (0.001~0.14), and unacceptable (0~0.001).

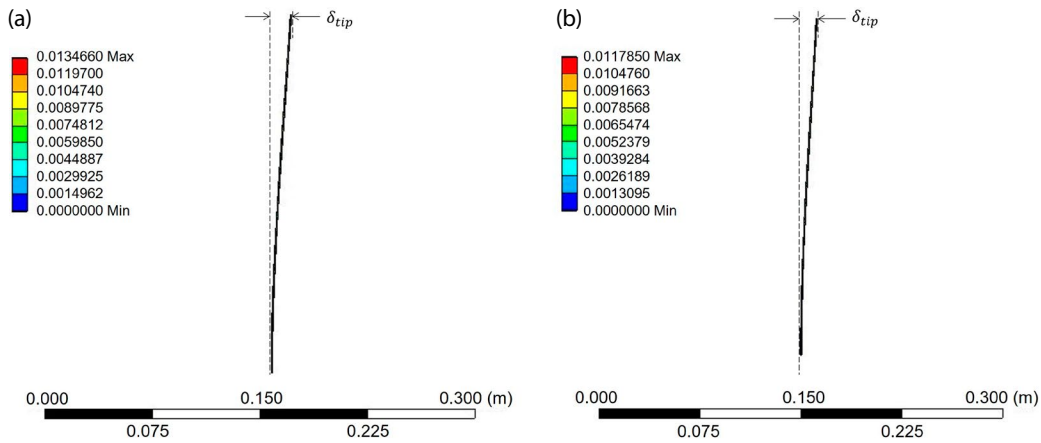

Fig. 5. Transverse displacement of vegetation (S1): (a) FSI simulation results and (b) SA simulation results.

Table 5. Comparison of maximum transverse displacement of vegetation (FSI simulation and SA simulation results)

Scenarios	Size (L × W × T, m^3)	Maximum transverse deformation, δ_{tip}		
		FSI simulation (m)	SA simulation (m)	Rel. % error (%)
S1	0.25 × 0.010 × 0.001	0.0135	0.0118	12.48
S2	0.35 × 0.015 × 0.001	0.0768	0.0795	3.47
S3	0.30 × 0.020 × 0.001	0.0495	0.0453	8.53
S4	0.30 × 0.010 × 0.001	0.0538	0.0512	4.82
S5	0.30 × 0.015 × 0.001	0.0504	0.0539	7.05
S6	0.35 × 0.010 × 0.001	0.1358	0.1396	2.74

(즉, 최대 변위)는 δ_{tip}으로 명명하였다. Table 2의 보 굽힘 거동 시뮬레이션 시나리오(6개)를 고려하여 획득한 최대 횡 방향 변위는 Table 5와 같다. 획득한 최대 횡 방향 변위와 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 결과를 비교하면 상대 % 오차는 2.74~12.48% 수준이다(Table 5, Fig. 6). 따라서 보의 굽힘 변형 모델(외팔보, 선형탄성)은 비교적 정확한 횡 방향 변위를 모사한다고 할 수 있다. 최대 횡 방향 변위는 14 cm 이하 수준이며, 식생의 길이(25, 30, 35 cm)를 고려할 때 최대 횡 방향 변위는 식생 길이(또는 높이)의 4.7~39.9% 수준이다. S2와 S6의 최대 횡 방향 변위(13.96, 7.95 cm)가 다른 식생보다 큰데, 이는 해당 식생의 높이(35 cm)가 다른 식생보다 크기 때문이다. 식생의 높이가 같은 경우에는 단면의 폭이 작은 모델의 횡 방향 변위가 크다(예: S6의 폭(1.0 cm)이 S2의 폭(1.5 cm)보다 작으므로 S6의 횡 방향 변위가 S2보다 크다). 이와 같은 현상은 모든 시나리오에서 식생의 재료학적 성질(예: 탄성계수)이 같으므로 횡 방향 변위가 보의 길이와 단면의 성질에 민감하게 반응하여 발생한다.

보의 굽힘 거동을 고려한 최대 횡 방향 변위와 첫 번째 인자($\alpha = L^4/EI$)의 관계를 나타내면 Fig. 7과 같다. 횡 방향 변위(유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 및 구조해석 수치 시뮬레이션)와 매개 인자는 유의한 양의 선형 관계($R^2 = 0.97$)를 나타낸다. 이는 첫 번째 매개 인자(α)를 활용하면, 식생의 굽힘 거동(최대 횡 방향 변위)을 어느 수준까지는 예측할 수 있음을 뜻한다. 이는 기존 연구(Chau *et al.*, 2024)에서 제시한 식생의 굽힘

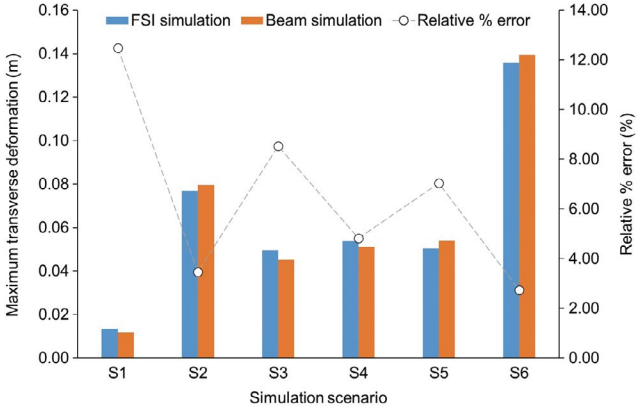

Fig. 6. Maximum transverse displacement of vegetation obtained from FSI simulation and SA simulation, and their relative % error.

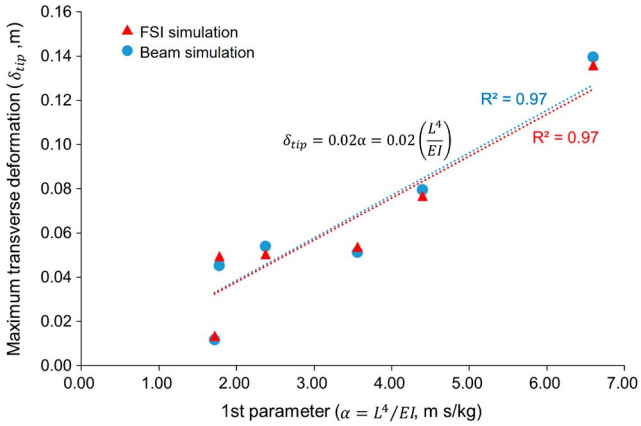

Fig. 7. Correlation between maximum transverse displacement of vegetation and the 1st parameter ($\alpha = L^4/EI$).

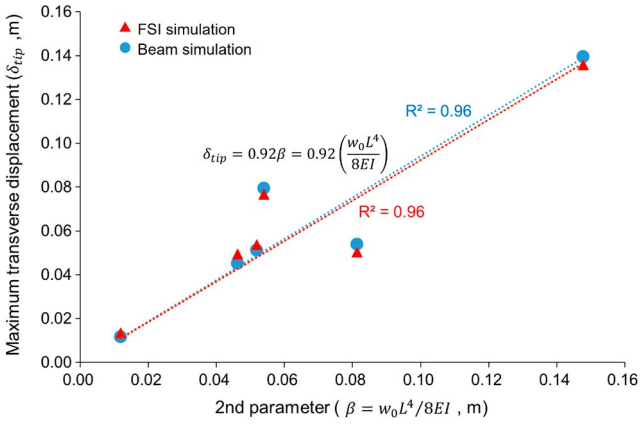

Fig. 8. Correlation between maximum transverse displacement of vegetation and the 2nd parameter ($\beta = w_0L^4/8EI$).

높이(h_b)를 예측하는 다중 회귀 방정식의 적합성을 보강하는 결과라 할 수 있다. 상관 관계식을 나타내면 Eq. 1과 같다.

$$\delta_{tip} = 0.02\alpha = 0.02\left(\frac{L^4}{EI}\right) \tag{1}$$

오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 식생의 전면과 후면에 작용하는 평균압력(Table 3)을 등분포하중(w_0, N/m)으로 치환하면, 길이가 L인 외팔보의 최대 처짐은 $w_0L^4/8EI$이다. 이를 두 번째 인자($\beta = w_0L^4/8EI$)로 두고, 최대 횡 방향 변위와의 관계를 나타내면 Fig. 8과 같다. 횡 방향 변위(유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 및 구조해석 수치 시뮬레이션)와 매개 인자(β)는 유의한 양의 선형 관계($R^2 = 0.96$)를 나타낸다. 이는 두 번째 매개 인자를 활용해도, 식생의 굽힘 거동(횡 방향 최대 변위)을 어느 수준까지는 예측할 수 있음을 뜻한다. 이 또한 기존 연구(Chau *et al.*, 2024)에서 제시한 식생의 굽힘 높이(h_b)를 예측하는 다중 회귀 방정식의 적합성을 보강하는 결과라 할 수

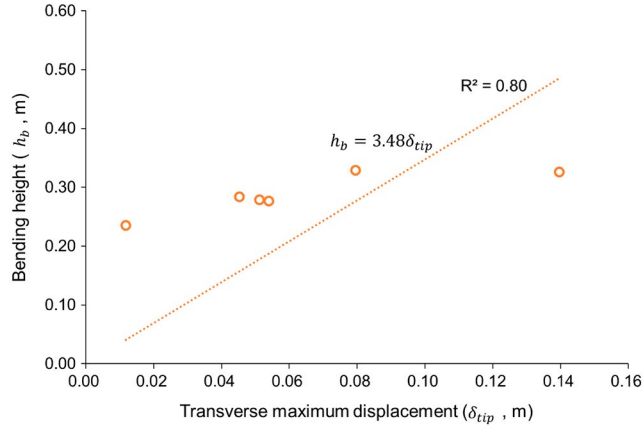

Fig. 9. Correlation between maximum transverse displacement (δ_{tip}) and bending height (h_b) of vegetation.

있다. 상관 관계식을 나타내면 Eq. 2와 같다. Eq. 2에서 비례상수 '0.92'가 '1'이 아닌 이유는 식생에 작용하는 전면 및 후면 압력(Fig. 2)을 선형화하여 평균압력(Table 3)으로 변환했기 때문이다.

$$\delta_{tip} = 0.92\beta = 0.92\left(\frac{w_0L^4}{8EI}\right) \tag{2}$$

기존 연구(Chau *et al.*, 2024)가 제시한 식생의 굽힘 높이(h_b)와 본 연구에서 획득한 횡 방향 최대 변위(δ_{tip})의 상관관계는 Fig. 9와 같다. 선형 상관 계수는 $R^2 = 0.80$으로 두 변수 사이에 유의한 양의 상관 관계가 나타남을 알 수 있다. 이는 해당 상관 관계식인 Eq. 3을 이용하면 식생의 굽힘 높이를 추정할 수 있음을 뜻한다. Eq. 2를 고려하면 Eq. 3은 Eq. 4로 표현된다.

$$h_b = 3.48\delta_{tip} \tag{3}$$

$$h_b = 3.48(0.92\beta) = 3.20\left(\frac{w_0L^4}{8EI}\right) \tag{4}$$

Eq. 4에서 등분포하중(w_0)은 식생에 작용하는 압력과 관련되며, 압력은 수심에 따른 정수압과 물 흐름에 따른 동수압을 포함한다. 동수압이 정수압보다 매우 크다고 가정하면(식생 서식지의 수심을 고려할 때) 궁극적으로 등분포하중(w_0)은 유속(V)의 함수($w_0 = f_1(V)$)라 할 수 있다. 외팔보의 길이(L)는 식생의 높이(h_v)이며 외팔보의 탄성계수(E)는 식생의 탄성계수(E_v)이다. 외팔보의 중립축에 관한 단면 이차모멘트(I)는 식생의 폭(w_v)과 두께(t_v)의 함수($I = f_2(w_v, t_v)$)이다. 따라서 외팔보의 최대 횡 방향 변위(δ_{tip}) 또는 굽힘 높이(h_b)는 유속(V), 식생의 높이(h_v), 식생의 탄성계수(E_v), 식생의 폭(w_v), 식생의 두께(t_v)에 종속되는 함수이다. 이를 나타내면 Eq. 5와 같다.

$$h_b = f(V, h_v, E_v, w_v, t_v) \tag{5}$$

고 찰

기존 연구(Chau *et al.*, 2024)에서 제안된 다중 회귀 방정식은 Buckingham Π 정리(Buckingham, 1915; Dumka *et al.*, 2022)를 적용하여 Eq. 6과 같이 구축되었다.

$$h_b = 1.2831 h_v \left(\frac{w_v}{h_v}\right)^{0.0145} \left(\frac{t_v}{h_v}\right)^{0.0676} \left(\frac{\rho_v V^2}{E_v}\right)^{-0.0051} . \quad (6)$$

Eq. 6에서 h_b는 식생의 굽힘 높이(굽혀진 후 높이), h_v는 식생 높이(초기 높이), t_v는 식생의 두께, w_v는 식생의 폭, ρ_v는 식생의 질량 밀도, E_v는 탄성계수, V는 유속을 나타낸다.

궁극적으로 Eq. 5와 Eq. 6의 차이점은 식생 밀도(ρ_v)에 있다. 이와 같은 차이점은 본 연구에서 수행한 구조해석 수치 시뮬레이션에서 식생에 작용하는 압력의 방향과 중력의 방향이 직교하여 중력이 식생의 굽힘에 미치는 영향이 미미하다는 가정에서 발생한다. 이는 Eq. 2에서의 비례상수 '0.92'가 '1'이 아닌 또 다른 이유가 된다. 즉, 식생에 작용하는 전면 및 후면 압력(Fig. 2)을 선형화하여 평균압력(Table 3)으로 변환하고, 식생의 중력이 식생의 굽힘에 미치는 영향이 미미하다고 가정한 것이 그 이유이다. 따라서 보의 굽힘 거동에 근거하여 제안된 Eq. 4는 기존 연구가 제안한 Eq. 6의 적합성을 더욱 보완한다고 할 수 있다.

식생 높이를 사용하여 파고 감소를 추정하는 것은 물 흐름에 의해 식생의 굽힘이 발생하지 않는다고 가정하거나, 식생의 초기 높이와 식생의 굽힘 높이의 차이가 크지 않다고 가정하기 때문이다. 이와 같은 가정은 식생이 비교적 단단하여 유동장에서 굽힘 효과가 작을 때 적절하다고 할 수 있다(Maza *et al.*, 2015). 하지만 기존 연구 결과는 단단한 식생과 유연한 식생의 파고 감소 효과는 다르다고 밝히고 있다. 이를 요약하면 다음과 같다. 단단한 식생이 유연한 식생보다 파고를 약 10% 더 효과적으로 줄일 수 있다(Chau *et al.*, 2024). 유연한 식생이 흔들리면 식생의 정면 면적, 항력이 수행하는 총 일, 식생 위를 이동할 때 손실되는 총 파랑 에너지가 줄어들기 때문에 유연한 식생이 단단한 식생보다 파도를 최대 70% 덜 감쇠시킨다(van Veelen *et al.*, 2020). 단단한 식생이 유연한 식생에 비해 파고를 줄이는 데 더 효과적이다(Liu *et al.*, 2023; 하지만 해당 연구는 감소 범위를 특정하지 않았다). 식생 줄기의 강성에 따라 파도 소산이 증가하며, 유연한 식생 줄기에서의 전반적인 파동 소산은 단단한 줄기에서 관찰된 것의 ~30% 수준이다(Mullarney and Henderson, 2010). 따라서 식생의 굽힘 높이를 추정하는 것은 식생의 파고 및 파랑 에너지 감소 효과의 정량화에 필요하다. 이런 관점에서 본 연구에서 수행한 식생의 굽힘 높이 추정 방법은 유동장에 기반한 기존 연구 결과를 보완하고, 압력장의 관점에서 식생 굽힘 거동에 대한 고찰을 제공한다고 할 수 있다.

서론에서 밝힌 본 연구의 제한점을 고려하면 본 연구는 다음과 같이 확장될 수 있다. 첫째, 해양에서 식생은 단일로 존재하지 않고 초원을 이루고 있는 경우가 많다. 따라서 모든 식생 줄기가 물 흐름에서 같은 수준으로 굽혀진다고 할 수 없다. 따라서 단일 식생이 군체(또는 초원)를 이룰 때 식생 간의 상호작용이 해석에 고려되어야 한다. 캐노피(canopy)를 이루는 유연한 해초(seagrass)는 낮은 파동 주파수보다 높은 파동 주파수에서 더 딱딱하게 행동하여, 딱딱한 식물 줄기의 행동에 더 가깝게 거동하는 것으로 알려져 있다(Barcelona *et al.*, 2023). 둘째, 식생에 작용하는 유속은 일반적으로 시간에 의존적이다. 따라서 시간 종속적 해석 기법을 개발하거나, 다양한 유속을 고려하여 해석의 일반성을 확대할 필요가 있다. 셋째, 식생은 유동장에서 굽혀지기도 하지만 흔들리기도 한다. 따라서 이들 거동의 특성을 차별하여 분석하고, 식생 거동을 자세히 해석할 필요가 있다. 넷째, 본 연구에서 고려한 인공 식생의 횡 방향 변위는 비교적 크지 않지만, 식생의 종류와 주변 환경(예: 작용력)에 따라서 식생의 거동이 비선형성(기하학적, 재료학적)을 나타낼 수 있다. 따라서 대변형, 비탄성 등을 고려한 비선형 해석 기법을 개발할 필요가 있다. 다섯째, 바다숲 조성에 필요한 다양한 공학적 공법을 식생의 거동 해석에 활용할 필요가 있다. 예를 들면 서식지 개선구조물에 이식되거나 조성된 식생의 거동을 들 수 있다. 이를 위해서는 인공어초(artificial reefs) 연구에서 활용된 다양한 해석 기법(예: Kim *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022)이 활용될 수 있다.

결 론

본 연구에서는 식생을 외팔보로 모형화하여 식생의 최대 횡 방향 변위를 획득하고, 이를 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 구조해석 수치 시뮬레이션 결과와 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 결과를 비교하면 상대 % 오차는 2.74~12.48%의 수준이다. 따라서 구조해석 수치 시뮬레이션에서 보의 굽힘 변형 모델(외팔보, 선형탄성)은 비교적 정확한 횡 방향 변위를 모사한다고 할 수 있다. 최대 횡 방향 변위는 14 cm 이하이며, 이는 식생의 길이(25, 30, 35 cm)를 고려할 때 4.7~39.9% 수준이다. 또한, 보의 굽힘 거동을 고려한 최대 횡 방향 변위와 매개 인자(α와 β) 사이에 유의한 양의 선형 관계($R^2 = 0.97$ 또는 0.96)가 성립한다. 이는 식생의 최대 횡 방향 변위(δ_{tip}) 또는 굽힘 높이(h_b)가 유속(V), 식생의 높이(h_v), 식생의 탄성계수(E_v), 식생의 폭(w_v), 식생의 두께(t_v)에 종속되고, 이들 매개 인자를 활용하면, 압력장에서 식생의 굽힘 거동, 즉 최대 횡 방향 변위와 굽힘 높이를 어느 수준까지 예측할 수 있음을 뜻한다. 따라서 해당 결과는 유동장에서 유체-구조 상호작용 시뮬레이션으로 제안한 식생 굽힘 높이에 관한 다중 회귀 방정식의 적합성을 더욱 강화한다고 할 수 있다.

적 요

오늘날 우리는 해양 식생을 파랑 에너지가 초래하는 피해로부터 해안 지역사회와 생태계를 보호하는 리빙 쇼라인으로 간주하고 있다. 이는 해양 식생 초원이 파도를 늦추고, 파의 높이와 에너지를 줄이는 자연 장벽 역할을 하기 때문이다. '리빙 쇼라인'을 구축하기 위해서는 해양 식생의 움직임(굽힘 및 흔들림)을 연구할 필요가 있다. 본 연구에서는 식생을 외팔보로 모형화하여 식생의 최대 횡 방향 변위를 획득하고, 이를 유체-구조 상호작용 수치 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 해석 결과의 상대 % 오차는 2.74~12.48% 수준이었으며, 이는 구조해석 수치 시뮬레이션에서 보의 굽힘 변형 모델(외팔보, 선형탄성)이 비교적 정확하게 횡 방향 변위를 모사함을 뜻한다. 또한, 보의 굽힘 거동을 고려한 최대 횡 방향 변위와 매개 인자는 유의한 양의 선형 관계($R^2=0.97$ 또는 0.96)를 나타낸다. 이는 식생의 최대 횡 방향 변위 또는 굽힘 높이가 유속, 식생의 높이, 식생의 탄성계수, 식생의 폭, 식생의 두께에 종속되고, 이들 매개 인자를 활용하면, 압력장에서 식생의 굽힘 거동, 즉 최대 횡 방향 변위와 굽힘 높이를 어느 수준까지 예측할 수 있음을 뜻한다. 따라서 해당 결과는 유동장에서 유체-구조 상호작용 시뮬레이션으로 제안한 식생 굽힘 높이에 관한 다중 회귀 방정식의 적합성을 더욱 강화한다고 할 수 있다.

사 사

이 연구의 일부는 (주)선진해양의 '유동장에서의 해양식생의 굽힘 높임 산정'을 통해서 지원되었다.

참고 문헌

ANSYS Inc., 2020. 3 Steps to Improve FEM Models. Accessed 3 Jan. 2025. https://www.ansys.com/blog/how-to-improve-fea.

Augustin, L.N., J.L. Irish and P. Lynett, 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. *Coast. Eng*., 56, 332-340.

Bach, L.T., V. Tamsitt, J. Gower, C.L. Hurd, J.A., Raven and P.W. Boyd, 2021. Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic Sargassum Belt. *Nat. Commun*., 12, 2556.

Bai, G., D. Xu, Y. Zou, Y. Liu, Z. Liu, F. Luo, C. Wang, C. Zhang, B. Liu, Q. Zhou, F. He, Z. Wu and Y. Zhang, 2022. Impact of submerged vegetation, water flow field and season changes on sediment phosphorus distribution in a typical subtropical shallow urban lake: Water nutrients state determines its retention and release mechanism. *J. Environ. Chem. Eng*., 10, 107982.

Barahimi, M. and J. Sui, 2023. Effects of submerged vegetation arrangement patterns and density on flow structure. *Water*, 15, 176.

Barcelona, A., J. Colomer and T. Serra, 2023. Stem stiffness functionality in a submersed canopy patch under oscillatory flow. *Sci. Rep*., 13, 1904.

Box, W., J. Järvelä and K. Västilä, 2021. Flow resistance of floodplain vegetation mixtures for modelling river flows. *J. Hydrol*., 601, 126593.

Buckingham, E., 1915. The principle of similitude. *Nature*, 96, 396-397.

Cao, H., Y. Chen, Y. Tian and W. Feng, 2016. Field investigation into wave attenuation in the mangrove environment of the South China Sea coast. *J. Coastal Res*., 32, 1417-1427.

Chau, T.V., S. Jung, M. Kim and W.B. Na, 2024. Analysis of the bending height of flexible marine vegetation. *J. Mar. Sci. Eng*., 12(7), 1054.

Clarke, S.J., 2002. Vegetation growth in rivers: Influences upon sediment and nutrient dynamics. *Prog. Phys. Geog*., 26, 159-172.

Delaware living shoreline committee, 2024. About living shorelines. Accessed 3 January 2025. https://www.delawarelivingshorelines.org/what-is-a-living-shoreline.

Duffy, J.E., L. Benedetti-Cecchi, J. Trinanes, F.E. Muller-Karger, R. Ambo-Rappe, C. Bostrom, A.H. Buschmann, J. Byrnes, R.G. Coles, J. Creed, *et al.*, 2019. Toward a coordinated global observing system for seagrasses and marine macroalgae. *Front. Mar. Sci*., 6, 317.

Dumka, P., R. Chauhan, A. Singh, G. Singh and D. Mishra, 2022. Implementation of Buckingham's Pi theorem using Python. *Adv. Eng. Softw*., 173, 103232.

Falkowski, P., 2012. Ocean science: The power of plankton. *Nature*, 483, S17-S20.

Folkard, A.M., 2005. Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patches in shallow water. *Limnol. Oceanogr*., 50, 1592-1600.

Fonseca, M.S. and J.A. Cahalan, 1992. A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrass. *Estuar. Coast. Shelf Sci*., 35, 565-576.

Fonseca, M.S. and W.J. Kenworthy, 1987. Effects of current on photosynthesis and distribution of seagrasses. *Aquat. Bot*., 27, 59-78.

Ghaderpour, E., A.B. Abbes, M. Rhif, S.D. Pagiatakis and I.R. Farah, 2020. Non-stationary and unequally spaced NDVI time series analyses by the LSWAVE software. *Int. J. Remote Sens*., 41, 2374-2390.

Hashim, A.M. and S.M.P. Catherine, 2013. A Laboratory study on wave reduction by mangrove forests. *APCBEE Procedia*, 5, 27-32.

He, F., J. Chen and C. Jiang, 2019. Surface wave attenuation by vegetation with the stem, root and canopy. *Coast. Eng*., 152, 103509.

He, Y. and E. Lee, 2016. Empirical relationships of sea surface temperature and vegetation activity with summer rainfall variability over the Sahel. *Earth Interact*., 20(6), 1-18.

Hong, S.J. and J.H. Lee, 2022. Distribution of seagrass in the Southwest Coast and Dadohaehaesang National Park of Korea. *Aqua. Nature*, 2(1), 39-47.

John, B.M., K.G. Shirlal and S. Rao, 2015. Effect of artificial sea grass on wave attenuation- an experimental investigation. *Aquat. Procedia*, 4, 221-226.

Jung, S., V.T. Chau, M. Kim and W.B. Na, 2022. Artificial seaweed reefs that support the establishment of submerged aquatic vegetation beds and facilitate ocean macroalgal afforestation: A review. *J. Mar. Sci. Eng*., 10, 1184.

Kim, D., S. Jung and W.B. Na, 2021. Evaluation of turbulence models for estimating the wake region of artificial reefs using particle image velocimetry and computational fluid dynamics. *Ocean Eng*., 223, 108673.

Koftis, T., P. Prinos and V. Stratigaki, 2013. Wave damping over artificial Posidonia oceanica meadow: A large-scale experimental study. *Coast. Eng*., 73, 71-83.

Lang-wong, A., G. Drews, N. Schulz, R. McDonald, T. Plant, P. Heavyside, A. Mora-soto and M. Sattler, 2022. Seaforestation: benefits to the climate, the ecosystems, and the people of British Columbia. An Ocean Wise Report. https://ocean.org/app/uploads/2022/07/OceanWise-SeaforestationV1-1.pdf

Lee, I.C., D. Kim, S. Jung and W.B. Na, 2020. Prediction of primary physical measures for cost-effective management of artificial seaweed reefs. *Mar. Technol. Soc. J*., 54, 25-43.

Lee, Y.J., S. Jung and W.B. Na, 2022. Estimating movement and falling distances of underwater free-falling cuboid models for marine habitat enhancement structures considering horizontal water flow. *Ocean Eng*., 262, 112172.

Liu, S., S. Xu and K. Yin, 2023. Optimization of the drag coefficient in wave attenuation by submerged rigid and flexible vegetation based on experimental and numerical studies. *Ocean Eng*., 285, 115382.

Losada, I.J., M. Maza and J.L.A. Lara, 2016. new formulation for vegetation-induced damping under combined waves and currents. *Coast. Eng*., 107, 1-13.

Luhar, M. and H.M. Nepf, 2011. Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation. *Limnol. Oceanogr*., 56, 2003-2017.

Manousakas, N., M. Salauddin, J. Pearson, P. Denissenko, H. Williams and S. Abolfathi, 2022. Effects of seagrass vegetation on wave runup reduction - a laboratory study. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*., 1072, 012004.

Maza, M., J.L. Lara, I.J. Losada, B. Ondiviela, J. Trinogga and T.J. Bouma, 2015. Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental analysis. *Coast. Eng*., 106, 73-86.

Mora, C., C.L. Wei, A. Rollo, T. Amaro, A.R. Baco, D. Billett, L. Bopp, Q. Chen, M. Collier, R. Danovaro, *et al.*, 2013. Biotic and human vulnerability to projected changes in ocean biogeochemistry over the 21st century. *PLoS Biol*., 11, e1001682.

Morris, R.L., T.D.J. Graham, J. Kelvin, M. Ghisalberti and S.E. Swearer, 2020. Kelp beds as coastal protection: wave attenuation of *Ecklonia radiata* in a shallow coastal bay. *Ann. Bot*., 125, 235-246.

Mullarney, J.C. and S.M. Henderson, 2010. Wave-forced motion of submerged single-stem vegetation. *J. Geophys. Res. Oceans*. 115, C12061.

NOAA, 2024. What is a living shoreline? Accessed 3 January 2025. https://oceanservice.noaa.gov/facts/living-shoreline.html#transcript.

N'Yeurt, A.R., D.P. Chynoweth, M.E. Capron, J.R. Stewart and M.A. Hasan, 2012. Negative carbon via ocean afforestation. *Process Saf. Environ. Protect*., 90, 467-474.

Nowacki, D.J., A. Beudin and N.K. Ganju, 2017. Spectral wave dissipation by submerged aquatic vegetation in a back-barrier estuary. *Limnol. Oceanogr*., 62, 736-753.

Oliver, E.C.J., M.G. Donat, M.T. Burrows, P.J. Moore, D.A. Smale, L.V. Alexander, J.A. Benthuysen, M. Feng, A.S. Gupta, A.J. Hobday, N.J. Holbrook, S.E. Perkins-Kirkpatrick, H.A. Scannell, S.C. Straub and T. Wernberg, 2018. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat. Commun*., 9, 1324.

Paquier, A.E., T. Oudart, C. Le Bouteiller, S. Meulé, P. Larroudé and R.A. Dalrymple, 2021. 3D numerical simulation of seagrass movement under waves and currents with GPUSPH. *Int. J. Sediment Res*., 36, 711-722.

Paul, M., T.J. Bouma and C.L. Amos, 2012. Wave attenuation by submerged vegetation: Combining the effect of organism traits and tidal current. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 444, 31-41.

Sánchez-González, J.F., V. Sánchez-Rojas and C.D. Memos, 2011. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows. *J. Hydraul. Res*., 49, 503-514.

Sigman, D.M. and M.P. Hain, 2012. The biological productivity of the ocean. *Nature Education Knowledge*, 3, 21.

Sigren, J.M., J. Figlus and A.R. Armitage, 2014. Coastal sand dunes and dune vegetation: Restoration, erosion, and storm protection. *Shore & Beach*, 82, 5-12.

Stocker, B.D., S.J. Tumber-Dávila, A.G. Konings, M.C. Anderson, C. Hain and R.B. Jackson, 2023. Global patterns of water storage in the rooting zones of vegetation. *Nat. Geosci*., 16, 250-256.

Stratigaki, V., E. Manca, P. Prinos, I.J. Losada, J.L. Lara, M. Sclavo, C.L. Amos, I. Cáceres and A. Sánchez-Arcilla, 2011. Large-scale experiments on wave propagation over *Posidonia oceanica*. *J. Hydraul. Res*., 49, 31-43.

Tang, C., Y. Liu, Z. Li, L. Guo, A. Xu and J. Zhao, 2021. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China. *Ecol. Indic*., 129, 107956.

Toromanovic, M., J. Ibrahimpašić, L. Topalić-Trivunović and I. Šišić, 2018. Removal of organic pollutants from municipal wastewater by a horizontal pilot-scale constructed wetland utilizing *Phragmites australis* and *Typha latifolia* - Effectiveness monitoring per season. *J. Chem. Technol. Environ*., 10, 39-44.

Twomey, A.J., K.R. O'Brien, D.P. Callaghan and M.I. Saunders, 2020. Synthesising wave attenuation for seagrass: Drag coefficient as a unifying indicator. *Mar. Pollut. Bull*., 160, 111661.

van Veelen, T.J., T.P. Fairchild, D.E. Reeve and H. Karunarathna, 2020. Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure. *Coast. Eng*., 157, 103648.

Wang, C., S.S. Zheng, P.E. Wang and J. Qian, 2014. Effects of vegetations

on the removal of contaminants in aquatic environments: A review. *J. Hydrodyn*., 26, 497-511.

Weitzman, J.S., R.B. Zeller, F.I.M. Thomas and J.R. Koseff, 2015. The attenuation of current- and wave-driven flow within submerged multispecific vegetative canopies. *Limnol. Oceanogr*., 60, 1855-1874.

Wernberg, T. and K. Filbee-Dexter, 2019. Missing the marine forest for the trees. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 612, 209-215.

Yin, K., S. Xu, W. Huang, S. Liu and M. Li, 2021. Numerical investigation of wave attenuation by coupled flexible vegetation dynamic model and XBeach wave model. *Ocean Eng*., 235, 109357.

Yiping, L., D.O. Anim, Y. Wang, C. Tang, W. Du, N. Lixiao, Z. Yu, K. Acharya and L. Chen, 2015. Laboratory simulations of wave attenuation by an emergent vegetation of artificial *Phragmites australis*: An experimental study of an open-channel wave flume. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag*., 23, 251-266.

Zeller, R.B., J.S. Weitzman, M.E. Abbett, F.J. Zarama, O.B. Fringer and J.R. Koseff, 2014. Improved parameterization of seagrass blade dynamics and wave attenuation based on numerical and laboratory experiments. *Limnol. Oceanogr*., 59, 251-266.