

## 유연한 인공 수생 식물을 이용한 파랑 감쇠 성능 실험 및 평가

최병준<sup>1</sup> · 허상환<sup>2</sup> · 구원철<sup>3,†</sup><sup>1</sup>인하대학교 조선해양공학과 대학원생<sup>2</sup>인하대학교 조선해양공학과 연구원<sup>3</sup>인하대학교 조선해양공학과 교수Experimental Evaluation of Wave Attenuation Performance  
Using Flexible Artificial Aquatic VegetationByoung June Choi<sup>1</sup>, Sanghwan Heo<sup>2</sup>, and WeonCheol Koo<sup>3,†</sup><sup>1</sup>Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea<sup>2</sup>Researcher, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

## 요 약

기후변화로 인해 전 세계 연안 지역에서 침식과 홍수 위험이 증가하고 있으며, 이를 대응하기 위한 기존의 콘크리트 방파제나 제방과 같은 경직된 연안 구조물은 경제적·환경적으로 지속 가능하지 않은 한계를 가진다. 이에 본 연구는 수생 식물의 파랑 에너지 소산 기능을 공학적으로 모사한 유연한 인공 수초를 활용하여 파랑 감쇠 효과를 실험적으로 평가하였다. 이차원 조파수조 실험을 통해, 인공 수초의 개수(N), 밀도(VD), 수초 영역길이(L), 수초 영역 수심(D) 등 주요 변수들을 산정하고 입사파에 대한 파랑 감쇠 효과를 체계적으로 분석하였다. 인공 수초 앞에 설치된 초음파 파고계로 계속된 파고를 3점법을 이용하여 입사파와 반사파로 분리하였고, 수초 후면에서는 투과파를 계속하였다. 반사, 투과, 소산 계수를 산출하여 에너지 감쇠 성능을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, N과 D가 파랑 감쇠에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 확인되었다. 이는 높은 식생영역의 밀도는 유동 교란과 난류를 증진시켜 에너지 소산을 향상시키며, 수초 설치 영역의 수심이 얕으면 자유 수면 근처의 파랑 입사 속도가 감소하여 파랑 감쇠 효과가 강화되었다. 본 연구는 인공 수생식물에 대한 자연기반 파랑 저감 기술의 실험적 평가와 경제적·환경적 타당성 분석의 기초 자료로서 활용될 수 있다.

**Abstract** – Climate change has increased the risks of coastal erosion and flooding worldwide, while conventional rigid coastal structures, such as concrete breakwaters and seawalls, face limitations in terms of economic and environmental sustainability. This study experimentally evaluates the wave attenuation performance of flexible artificial aquatic vegetation designed to emulate the energy dissipation mechanisms of natural vegetation. Two-dimensional wave flume experiments were conducted to investigate the effects of key parameters, including the number of vegetation elements (N), vegetation density (VD), vegetation field length (L), and water depth within the vegetation field (D), on wave attenuation. Wave elevations measured by ultrasonic wave gauges in front of the vegetation field were separated into incident and reflected components using the three-point method, while transmitted waves were measured downstream. Reflection, transmission, and dissipation coefficients were calculated to quantitatively assess wave energy attenuation. Correlation analysis indicates that the number of N and the water depth within the D are the dominant factors influencing wave attenuation. Increased vegetation density enhances flow disturbance and turbulence, leading to greater energy dissipation, whereas shallower water depths reduce near-surface wave particle velocities and further strengthen attenuation. This study can serve as fundamental experimental data for the evaluation of nature-based wave attenuation technologies using artificial aquatic vegetation, as well as for the assessment of their economic and environmental feasibility.

**Keywords:** Wave attenuation(파랑 감쇠), Aquatic vegetation(수생 식물), Wave energy dissipation(파랑 에너지 소산), Wave absorber(소파 장치), Two-dimensional wave flume(이차원 조파수조)

<sup>†</sup>Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

본 논문은 2025년 한국해양공학회 추계학술대회 및 2025년 싱가포르에서 개최된 PAAMES AMEC 2025에서 발표된 논문을 근거로 보완·발전시킨 것임을 밝힙니다.

## 1. 서 론

전 지구적 기후 변화로 인한 해수면 상승과 극한 기상 현상의 빈번한 발생은 해안선 침식, 범람, 연안 생태계 파괴 등 심각한 환경 및 사회경제적 문제를 야기하며 전 세계적인 주요 현안으로 대두되고 있다(Hinkel *et al.* [2014]; IPCC [2014]; Morris *et al.* [2018]). 전 세계 인구의 절반 이상이 해안선에서 60 km 이내에 거주하며, 대도시의 4분의 3이 연안에 위치하는 현실을 고려할 때(UNEP [2005], as cited in Morris *et al.* [2018]), 침식과 범람은 인간의 삶에 직접적인 위협이 된다(Kittinger and Ayers [2010]; Hinkel *et al.* [2014]). 이러한 위협은 해안 인프라의 양적·경제적 가치가 증가함에 따라 점점 더 커지고 있으며, 미래 기후 변화는 해수면 상승, 파고 증가, 폭풍 발생 빈도의 증가 및 강도의 변화 등과 같은 위험 요인을 통해 지역 사회의 취약성을 더욱 심화시킬 것으로 예상된다(IPCC[2014]; Morris *et al.* [2018]). 실제로 전 세계 해변의 최소 70%가 침식 중이거나 퇴적물 수치가 부정적이며, 2100년까지 최대 4.6%의 글로벌 인구가 연간 홍수 위험에 노출될 수 있는 것으로 보고된다(Hinkel *et al.* [2014]; Morris *et al.* [2018]). 따라서 현재와 미래의 연안 위협으로부터 보호하고 이를 완화할 효과적인 방안 모색은 연안 지역 사회가 직면한 가장 시급한 과제이다.

해안 환경을 보호하거나 재해 대응을 위해 콘크리트 방파제 등 경성 구조물(hard-engineered structures)이 주된 수단으로 활용되어 왔다(Morris *et al.* [2018]). 그러나 이러한 구조물은 막대한 건설 및 유지 비용이 필요할 뿐만 아니라, 자연 퇴적물의 흐름을 차단하고 서식지를 훼손하여 해안 환경과 생태계를 단절시키는 근본적 한계를 가진다(Kittinger and Ayers[2010]). 또한, 미래의 기후 변화 시나리오에서 유지 관리 비용이 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이러한 한계로 인해 최근에는 자연의 기능을 모방하고 생태계의 복원력을 활용하는 자연 기반 해법(Nature-Based Solutions, NBS)이 지속 가능한 해안 보호 전략의 핵심으로 부상하고 있다. NBS는 파랑 에너지 감쇠뿐 만 아니라 생물 다양성 증진, 수질 개선, 탄소 저장 등 다중적 생태계 서비스를 제공할 수 있다(Morris *et al.* [2018]; Stankovic *et al.* [2023]). 특히 해초, 염습지, 맹그로브 등 수생 식물은 연안 환경에서 생태 공학적(ecological engineering)인 주체로서 주목받고 있다. 이들 수생식물들은 줄기, 잎, 뿌리 구조를 통해 항력(drag force)과 난류(turbulence)를 발생시켜 파를 효과적으로 감소시키고, 퇴적물 포집과 안정화를 촉진하여 자연적인 해안선의 안정성을 강화한다(Morris *et al.* [2018]). 더 나아가 이들은 블루 카본(blue carbon) 생태계의 핵심 구성 요소로서 장기간 탄소를 포집하여 기후 변화 완화에도 기여할 수 있다(Stankovic *et al.* [2023]).

다양한 자연 기반 해안 서식지의 파랑 감쇠 효과는 여러 현장 및 실험 연구를 통해 입증되어 왔다(Mork[1996]; Mendez and Losada [2004]; Hu *et al.* [2014]). 대표적으로 베트남의 맹그로브 군락은 복잡한 줄기와 뿌리 구조를 통해 파고를 최대 20%까지 저감시킬 수 있음이 관측되었으며, 이러한 감쇠 효과는 수심, 수목 밀도, 식재 폭 등 다양한 요인에 따라 달라진다(Mazda *et al.* [2006]; Chen *et*

*al.* [2018]). 미국 캘리포니아 연안의 거대 다시마 군락(Macrocyctis pyrifera) 역시 상당한 파랑 에너지 감쇠 효과를 보였으나, 식생의 밀도와 폭에 따라 그 효율이 크게 좌우되는 것으로 나타났다(Elwany *et al.* [1995]). 염습지 역시 폭풍 해일과 같은 극한 조건에서 파랑 에너지를 효과적으로 소산시킬 수 있음이 현장 관측과 수치 모델을 통해 확인되었다(Augustin *et al.* [2009]; Jadhav *et al.* [2013]). 이처럼 자연 상태의 수생 식물 군락은 파랑 에너지를 감쇠시키고 퇴적물을 안정화하여 해안선을 보호하는 중요한 역할을 수행한다(Mork [1996]; Mendez and Losada [2004]; Losada *et al.* [2016]).

자연 식생이 갖는 파랑 감쇠 기능을 공학적으로 활용하기 위해, 파랑과 식생 간의 복잡하고 비선형적인 상호작용을 정량적으로 규명하려는 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 초기 연구에서는 문제의 단순화를 위해 식생을 강체 원통(rigid cylinder)으로 이상화하였다. Dalrymple *et al.* [1984]은 강체 원통에 작용하는 항력을 기반으로 파랑 감쇠 모델의 이론적 기초를 제시하였으며, 이후 Kobayashi *et al.* [1993]은 이를 확장하여 유동에 따라 거동하는 유연한 수초를 고려한 보정된 경험적 모델을 제안하였다. 이러한 연구들은 식생의 물리적 특성이 파랑 감쇠에 미치는 영향을 이해하는 데 중요한 기초를 제공하였다.

그러나 대부분의 기존 모델은 식생의 형상과 유연성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 지니고 있다. 이를 보완하기 위해 Asano *et al.* [1992]과 Méndez *et al.* [1999]은 식생의 흔들림을 모델에 포함시켜 예측 정확도를 향상시키고자 하였으나, 실제 수생 식물에서 나타나는 복잡한 3차원 변형, 잎의 동적 거동, 그리고 식생과 유체 간 상대 속도 차이에 따른 비선형 상호작용을 정밀하게 재현하는 데에는 여전히 제약이 존재한다.

한편, 자연 수초 군락을 연안에 직접 이식하는 방식은 낮은 생존율, 긴 성장 기간, 그리고 높은 초기 비용과 같은 현실적인 한계를 수반한다. 이러한 배경에서 자연 수초의 유체역학적 파랑 감쇠 메커니즘을 모사하면서도 내구성과 시공성을 확보한 인공 수초의 공학적 활용 가능성을 검토하는 것이 중요하다. 그럼에도 불구하고, 다수의 선행연구에서는 여전히 식생을 강체 실린더 또는 단순화된 탄성체로 모델링하고 있어, 실제 유연한 수초가 파랑 하중에 노출될 때 나타나는 비선형 동적 거동과 에너지 소산 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다(Stephan and Gutknecht [2002]; Hu *et al.* [2014]; Chen *et al.* [2018]). 자연 상태의 수생 식물은 입사 파랑의 주기와 파장에 따라 유연하게 변형·거동함으로써 유동 교란과 난류를 증대시키고, 그 결과 파랑 에너지 소산 효율을 향상시킨다. 따라서 이러한 생체 모방(biomimicry)적 특성을 충실히 재현한 유연한 인공 수초의 파랑 저감 성능을 실험적으로 규명하는 연구는 학문적·실무적 측면에서 모두 중요한 의미를 갖는다.

본 연구는 스크류 바실네리아(Screw Vallisneria)의 나사말 형상과 유연한 잎 구조를 모방하여 제작한 인공 수초의 파랑 감쇠 성능을 이차원 조파수조에서 실험적으로 평가하였다. 기존 연구들(Asano *et al.* [1993]; Augustin *et al.* [2009])에서도 수초의 유연성을 일부 고려하였으나, 실제 잎 형상을 반영한 생체 모방 구조를 적용하여 동

적 거동을 재현한 연구는 제한적이었다. 또한 선행연구들은 주로 항력 계수 중심으로 파랑 감쇠 효과를 평가해 왔으나, 이는 수초 개수, 설치 길이, 수심 등 다양한 설치 조건 변화에 따른 감쇠 특성을 종합적으로 설명하는 데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 실제 형상을 반영한 인공 수초를 적용하고, 수초 개수, 밀도, 설치 길이 및 수심 등 주요 매개변수 변화가 파랑의 반사, 투과 및 소산에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 이를 통해 파랑 감쇠에 지배적인 인자를 도출하고, 환경 친화적인 연안·해양 구조물 보호 시스템 설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험 분석 방법

### 2.1 수생 식물 모델링

수생식물의 파랑 감쇠 성능을 평가하는 일반적인 접근법은 경험적으로 결정된 감쇠 계수를 사용하며, 수초 영역을 통과하면서 소산된 에너지는 calibration approach 방법(Mendez and Losada[2004])을 통해 구할 수 있다. 식생 영역을 통과하며 파고( $H$ )가 감쇠 되는 현상을 식 (1)과 같은 경험식으로 표현될 수 있으며, 여기서 식 (2)의 감쇠 계수  $\beta_{cali}$ 는 실험적으로 측정된 파고 데이터를 통해 결정된다. Dalrymple *et al.* [1984]은 식생 줄기에 작용하는 항력(drag force)이 파랑 에너지를 소산 시키는 주된 메커니즘이라고 가정하고, 이를 바탕으로 식 (3)와 같이 에너지 소산율  $\epsilon_v$ 를 정식화 하였다. 따라서, 실험에서 얻은  $\beta_{cali}$ 값과 식 (3)를 결합하여 식생의 고유한 유체역학적 특성인 항력 계수  $C_{D,cali}$ 를 역으로 추정하는 ‘보정(calibration)’ 방식이 널리 사용된다. 에너지 보존 방정식인 식 (4)는 파랑 에너지 플럭스  $EC_g$ 의 공간적 변화율이 식생에 의한 에너지 소산율  $\epsilon_v$ 과 같다는 물리적 원리를 나타낸다.

$$K_v = \frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \beta_{cali}x} \quad (1)$$

$$\beta_{cali} = \frac{4}{9\pi} C_{D,cali} b_v N_v H_0 k \frac{\sinh^3 kh_v + 3\sinh kh_v}{(\sinh 2kh + 2kh)\sinh kh} \quad (2)$$

$$\epsilon_v = \frac{2\pi}{3} \rho C_{D,cali} b_v N_v \left(\frac{kg}{2\sigma}\right)^3 \frac{\sinh^3 kh_v + 3\sinh kh_v}{(\sinh 2kh + 2kh)\sinh kh} H^3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = -\epsilon_v \quad (4)$$

여기서  $b_v$  = 줄기 직경 또는 특성 폭(Stem diameter or characteristic width),

$C_{D,cali}$  = 보정 항력 계수(Calibration drag coefficient),

$c_g$  = 군속도(Group velocity),

$H$  = 수초 영역 내부  $x$ 위치의 파고(Wave height at distance  $x$  within vegetation),

$H_0$  = 식생 전면의 파고(Wave height in front of vegetation),

$h_v$  = 평균 수초 높이(Mean vegetation height),

$N_v$  = 단위 수평 면적당 수초줄기의 개수

(number of vegetation stands per unit horizontal area)

$\beta_{cali}$  = 파랑 감쇠 계수(Wave damping coefficient),

$\epsilon_v$  = 단위 면적당 시간 평균 에너지 소산율

(Time-averaged rate of energy dissipation per unit area),

$\sigma$  = 각주파수(Angular frequency)

식생으로 유발된 항력을 통한 파랑 에너지 소산은 보통 감쇠 계수를 적용하여 구현하다. 이는 이전 연구들(Dalrymple *et al.* [1984]; Kobayashi *et al.* [1993])에서 지수 감소형태로 유사하게 널리 채택되었으며, 특히 강체 원통형 요소와 같은 단순화된 식생 모델에 적용할 때 효과적이다. 그러나 이러한 접근법은 유연하고 기하학적으로 복잡한 식생에 적용할 경우 정확성이 떨어진다. 실제 식생은 유연하게 휘고 흔들리면서 형상과 자세가 계속 바뀌기 때문에 항력을 유발하는 유효 단면적과 유체와의 상대 속도가 계속 변화된다(Asano *et al.* [1993]; Sánchez-González *et al.* [2011]). 이는 유연 구조에 대한 유체 역학적 거동은 입사파와의 비정상적이고 비선형적인 상호작용을 포함하게 되며, 단순한 감쇠 계수의 적용으로는 정확하게 포착할 수 없다는 의미이다(Chen *et al.* [2018]).

따라서, 유연한 인공 수초의 파랑 감쇠 성능을 평가하기 위해서는 각 수초의 비정상적, 불규칙 거동 현상을 일일이 모사하는 것은 거의 불가능하기 때문에, 수초를 군집 형태의 감쇠 영역으로 파악하여 군집의 밀도나 설치 길이 등의 파라미터로 표현하는 것이 필요하다. 이는 개별 식생의 복잡한 움직임 대신, 식생 군락 전체가 파랑장(wave field)에 미치는 거시적인 효과, 즉 에너지 감쇠 효과에 집중하는 접근법이다. 이를 통해, 입사파에 대한 반사파와 투과파의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다.

### 2.2 파랑 에너지 보존

앞서 설명한 바와 같이, 유연한 수초에 의한 파랑 감쇠 성능을 분석하기 위해서는 감쇠 계수를 적용하기 보다는 파 에너지의 보존 관계식을 통한 파랑 감쇠 분석이 실험 분석에서는 좀 더 현실적인 방법이다. 전체 입사파 에너지는 수초를 통과하면서 반사파와 투과파가 발생하고 이를 제외한 나머지가 수초에 의한 에너지 소산을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)와 같이 수초 영역 전체의 파랑 에너지 보존 관계식을 기반으로 파랑 감쇠를 평가하였다(Seelig and Ahrens[1981])

$$K_D^2 + K_R^2 + K_T^2 = 1 \quad (5)$$

여기서  $K_D$  = 소산 계수(Dissipation Loss coefficient),

$K_R$  = 반사 계수(Reflection coefficient),

$K_T$  = 투과 계수(Transmission coefficient)

반사 계수와 투과 계수는 반사파와 투과파를 측정하여 식 (6)과 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$K_R = H_R/H_I \quad (6)$$

$$K_T = H_T/H_I \quad (7)$$

여기서  $H_I$ ,  $H_R$ ,  $H_T$ 는 각각 입사파, 반사파, 투과파의 파고를 의미하며 소산 계수는 식 (5)를 이용하여 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$K_D = \sqrt{1 - (K_R^2 + K_T^2)} \quad (8)$$

### 2.3 삼점법

이차원 실험 수조에서 조파기에 의해 생성된 입사파는 수조 중앙에 설치된 인공 수초를 통과하면서 반사파와 투과파를 발생시킨다. 이때 초음파 파고계를 통해 수조 설치 영역 앞쪽에서 측정된 파고 데이터는 입사파와 반사파가 중첩된 합성파(composite wave)이며, 수조 설치 영역 후방에서는 식생에 의한 에너지 감쇠를 거친 투과파가 측정된다. 따라서 식생 군락의 정확한 반사 및 투과 성능을 평가하기 위해서는 계측된 합성파로부터 입사파와 반사파 성분을 분리하는 과정이 필요하다. 이를 위해 Goda and Suzuki [1976]에 의해 제안되고 Suh *et al.* [2001] 등에 의해 발전된 최소제곱법 기반의 다점 파고 분리법(multi-probe method)을 적용하였다. 이 방법은 여러 지점에서 동시에 측정된 파고의 시계열 데이터를 이용하여 각 파랑 성분의 진폭과 위상을 효과적으로 분리할 수 있다.

선형파 이론에 따라 진행파를 조화파(harmonic wave)로 가정했을 때, 특정 위치( $x$ )에서 측정되는 합성파의 수면 변위( $\eta$ )는 식 (9)와 같이 입사파와 반사파의 선형 중첩으로 표현할 수 있다.

$$\eta_n(t) = \frac{H_I}{2} \cos(k_I x_n - \omega_a t + \phi_I) + \frac{H_R}{2} \cos(k_R x_n - \omega_a t + \phi_R) + e_n(t) \quad (9)$$

여기서  $\phi_I$ 와  $\phi_R$ 는 입사파와 반사파의 위상각이다.  $\omega_a$ 는 파 주파수이고, 본 실험에서는 조류(Current)가 없기 때문에 파수  $k_I$ 와  $k_R$ 는 동일하기 때문에 이후  $k$ 로 통일한다. 파수  $k$ 는 분산관계식을 통하여 구할 수 있으며  $x_n$ 는 파고계의 위치이고  $e_n(t)$ 는 신호 잡음과 비선형 파 상호작용 등에 의한 측정 오차이다. 삼각함수 cosine 분리를 통하여 미지수( $X_1, X_2, X_3, X_4$ )를 분리하면 식 (10)과 같다. 3개 이상의 파고계에서 동시에 측정된 수면 변위 데이터( $\eta_n(t)$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ )를 이용하여 측정 오차의 제곱 합을 최소화하는 최소제곱법(least squares method)을 적용하면 미지수  $H_I$ ,  $H_R$ ,  $\phi_I$ ,  $\phi_R$ 를 결정할 수 있다. 이 계수들을 각각의 미지수에 대해 편미분하여 최종적으로 정리하면, 식 (11)과 같이 입사파와 반사파의 파고와 위상을 명확하게 분리할 수 있다(Goda and Suzuki[1976]).

$$\eta_n(t) = X_1 \cos(\omega_a t - k_I x_n) + X_2 \cos(\omega_a t + k_R x_n) + X_3 \sin(\omega_a t - k_I x_n) + X_4 \sin(\omega_a t + k_R x_n) + e_n(t) \quad (10)$$

$$\phi_I = \tan^{-1} \frac{X_3}{X_1}$$

$$\phi_R = \tan^{-1} \frac{X_4}{X_2}$$

$$H_I = \frac{2(X_1 + X_3)}{\cos \phi_I + \sin \phi_I}$$

$$H_R = \frac{2(X_2 + X_4)}{\cos \phi_R + \sin \phi_R} \quad (11)$$

이 방법은 실험에서 계측한 불규칙 파 조건에서도 푸리에 변환(FFT)을 통해 각 주파수 성분에 대해 동일하게 적용될 수 있다. 불규칙 파 분석에서 특정 주파수에서 파고계 간격이 파장의 정수배가 될 경우 특이점(singularity)이 발생할 수 있기 때문에 파고계 간격을 적절히 배치하는 것이 중요하다(Suh *et al.* [2001]; Lynett *et al.* [2009]).

### 3. 실험 구성

인공 수초는 Fig. 1(a)과 같은 나사말의 일종의 스크류 바실네리아(Screw Vallisneria) 형태의 모델과 이를 고정할 수 있는 고정판을 사용하였다. 수초의 평균 길이는 25 cm이고 너비는 1 cm, 두께는 약 0.2 cm이다. 수초 한 개에는 총 9개의 잎이 달려 있으며 단단한 줄기가 없고 전 구간이 잎으로 구성되어 기존의 실린더 형태의 막대 구조에 비해 유체 유동에 따라 유연한 움직임을 나타낸다. Fig. 1(b)와 같이 수초가 고정판에 부착되어 실험이 수행되었다. 이때 수초 고정판의 크기는 30 cm×30 cm이고 두께는 0.5 cm이다. 수초 고정판의 구멍 배치는 파의 진행 방향에 대해서 수초를 불규칙하게 배치하기 위해 지그재그 형식으로 제작되었다. Fig. 1(c)는 실제 실험 사진으로, 입사파가 좌측으로 전파되는 환경에서 수초 영역 전방에 3개의 파고계가 설치되었고, 후방에 1개의 파고계가 설치되었다. 이때 인공 수초는 물보다 낮은 밀도로 수조 끝에서 약간의 처짐을 제외하면 입사파 진행 방향에 수직하게 서 있게 되며, 수초 고정판에 의해 파가 투과하는 동안에도 위치를 이탈하지 않고 대형을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

인공 수초에 의한 파랑 감쇠 성능을 조사하기 위해 길이 6.0 m, 너비 0.3 m의 이차원 조파 수조에서 실험을 수행하였으며 Fig. 2에서와 같이 반사파 제어 센서가 포함된 피스톤 타입 조파기에서 규칙파를 생성하였다. 반사파 제어 센서는 조파기 앞에 설치되어

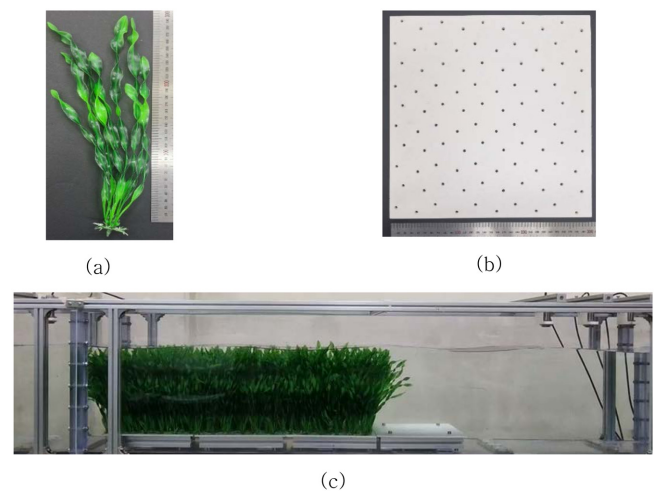


Fig. 1. Artificial vegetation and mounting plate used in the experiment: (a) flexible artificial vegetation, (b) vegetation fixing plate and (c) actual experiment.

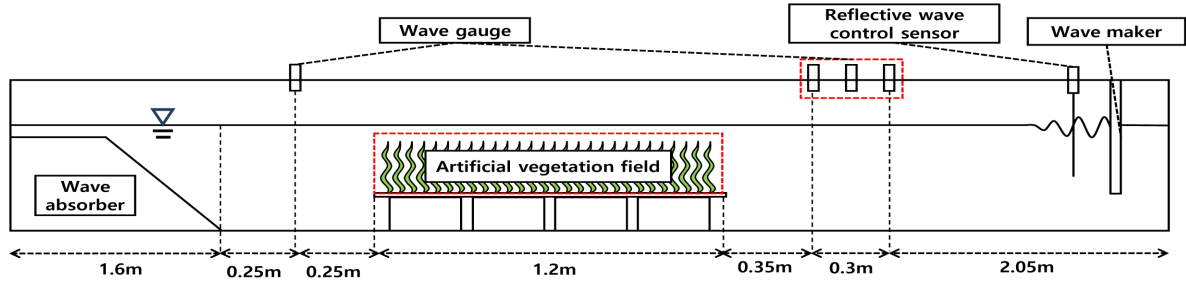


Fig. 2. Overview and experimental setup of the two-dimensional wave flume.

반사되어 돌아오는 파를 인식하여 일정한 조건의 입사파를 생성하도록 조파판의 운동을 제어하는 장치이다. 조파 구조의 후방 끝면에는 다공성 소파판이 설치되어, 전파된 파를 효과적으로 감쇠 시키며 약 10% 미만의 반사율을 나타내는 것으로 보고되었다 (Jung and Koo [2021]). 또한, 본 실험에서 소파판과 수생 식물에 의한 반사파는 반사계수 0.2 이하로 측정되어, Mendez and Losada [2004]에서 제시한 최대 허용 반사계수에 충족한다고 판단된다. 따라서, 실험 결과에 미치는 반사파의 영향은 크지 않다고 판단되었다. 삼점법을 위한 전방의 3개 파고계는 각각 0.15 m의 등간격으로 배치되었다.

수초의 파랑 감쇠 성능을 확인하기 위해 규칙파의 주기, 수초의 개수(N), 수초 밀도(VD), 수초 설치 영역의 길이(L), 설치 수심(D)을 환경 변수로 설정하였다. 실험에서 사용한 규칙파의 정보는 Table 1과 같다. 규칙파의 주기는 0.6초부터 1.1초까지 0.1초 단위로 총 6개의 입사파를 생성하였다. 모든 규칙파의 파장과 파고는 Stokes 2<sup>nd</sup>-order 파이며, 이차원 조파 수조에서 안정적으로 발생시킬 수 있는 조건이다. 또한 Fig. 3와 같이 수초의 설치 수심은 25 cm와 29 cm로 두가지 경우에 대해서 고려하였으며  $h_v$ 는 수초의 평균 높이이고,

설치 길이를 표시하였다. 따라서 수초 설치 수심 25 cm는  $h_v/D = 1$  이고 이는 수초 끝이 자유수면에 닿은 경우이고, 설치 수심 29 cm는  $h_v/D = 0.82$ 로 수초 끝이 자유수면 아래 수중에 위치하는 경우이다. 에너지 보존관계식을 이용하여 수초 영역에서의 파 에너지 소산을 구하기 위해서는 정확한 반사파와 투과파를 계산해야 한다. 수초 설치 영역 앞에서 예측한 파고를 삼점법을 이용하여 입사파와 반사파를 분리하였다. 삼점법은 선형파를 분리할 때 오차가 작다는 점을 고려하여, 본 실험에서는 파고 0.015 m로 설정하여 선형파에 근접한 파를 사용하였으며, 이는 데이터 추출 과정에서 발생하는 진동이나 노이즈로 인한 부가적인 오차가 발생하지 않을 정도의 파고이다.

수초 영역의 밀도는 수초 개수와 설치 길이(면적)의 비로 표현될 수 있는데, 총 5개의 밀도 조건을 사용하였다. Table 2는 수초 영역의 길이에 대해 수초 영역의 밀도와 수초 개수를 표시하였으며 전체 수초의 개수는 실험 환경 여건상 400개 이하로 제한하였다. 따라서 모든 환경 변수를 고려하여 총 204 가지 조건을 실험하였다.

Table 1. Characteristics of incident waves

| T (s) | omega (rad/s) | k (1/m) | λ (m) | $h/(gT^2)$ | $H/(gT^2)$ | Wave Type        |
|-------|---------------|---------|-------|------------|------------|------------------|
| 0.6   | 10.47         | 11.19   | 0.56  | 0.099      | 0.004      | Stokes 2nd order |
| 0.7   | 8.98          | 8.27    | 0.76  | 0.073      | 0.003      | Stokes 2nd order |
| 0.8   | 7.85          | 6.43    | 0.98  | 0.056      | 0.002      | Stokes 2nd order |
| 0.9   | 6.98          | 5.23    | 1.20  | 0.044      | 0.002      | Stokes 2nd order |
| 1     | 6.28          | 4.41    | 1.43  | 0.036      | 0.002      | Stokes 2nd order |
| 1.1   | 5.71          | 3.82    | 1.65  | 0.030      | 0.001      | Stokes 2nd order |

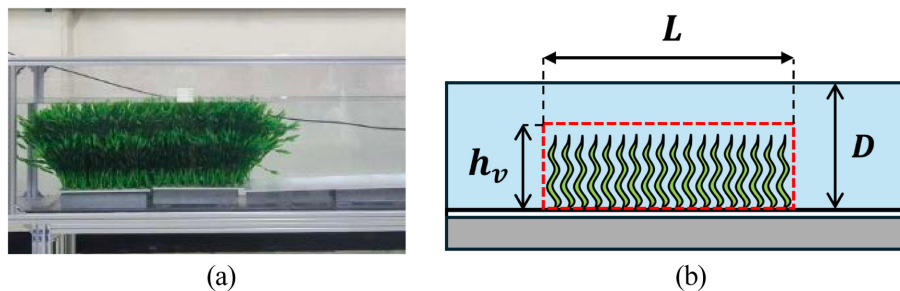


Fig. 3. Configuration of installed artificial vegetation and relevant environmental variables.

**Table 2.** Number of artificial seagrass units according to installation length and density

| L (cm) \ VD | VD1 (533.3) | VD2 (800.0) | VD3 (1066.7) | VD4 (1333.3) | VD5 (1600.0) |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 30          | 48          | 72          | 96           | 120          | 144          |
| 60          | 96          | 144         | 192          | 240          | 288          |
| 90          | 144         | 216         | 288          | 360          | -            |
| 120         | 192         | 288         | 384          | -            | -            |

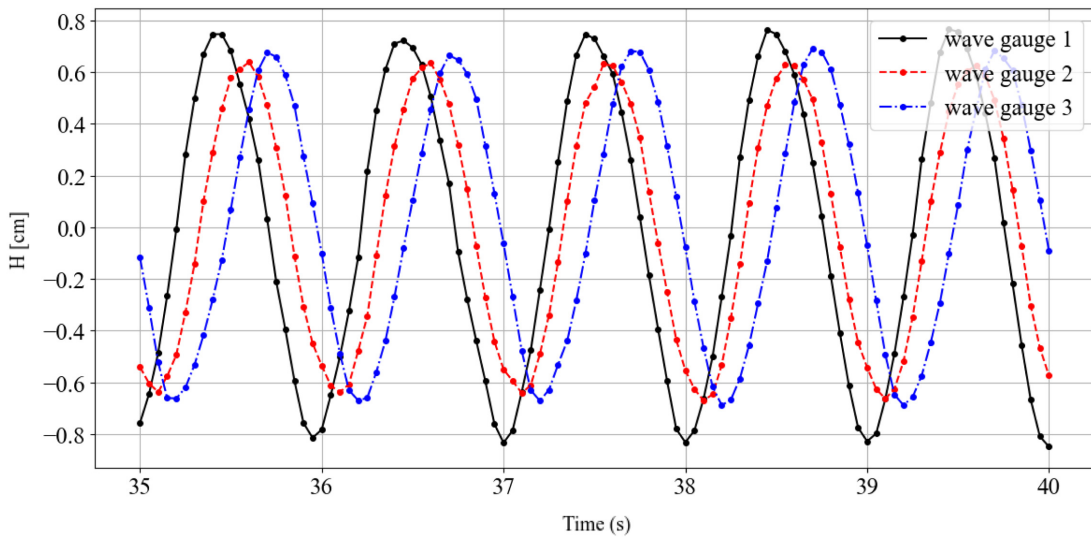
**4. 결과 및 고찰**

**4.1 반사 계수 비교**

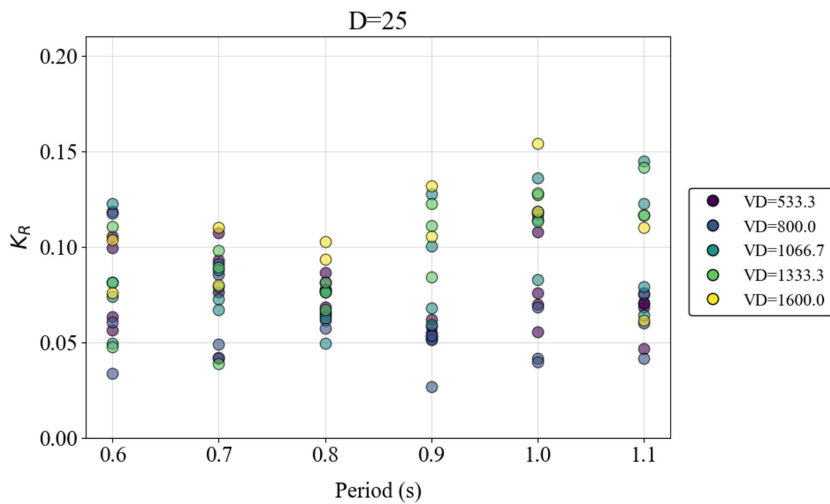
Fig. 4는 주기 1초의 입사파 조건에서 N=240, L=60, D=25일 때 수초 영역 전방에 설치된 3개의 파고계에서 측정한 파고 시계열을 비교한 것이다. 파고계 1, 2, 3 순으로 입사파가 진행하며, 각 지점에서 파정 크기가 서로 다르게 나타난다. 이는 수초 영역에서 발생한 반사파가 입사파와 서로 다른 위상으로 중첩되기 때문이다. 이

러한 위상차를 이용하여, 세 지점의 파고 자료를 삼점법으로 처리함으로써 입사파와 반사파를 분리할 수 있다.

Fig. 5는 설치 수심이 얇은 조건(D=25 cm)에서 각 수초 밀도에 따른 반사계수  $K_R$ 의 변화를 각 주기별로 비교한 결과이다. 전반적으로 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않았다. 이는 입사파에 대한 회전형 나사말 구조의 인공 수초의 반사 특성이 크게 달라지지 않은 것으로 보이며, 현재 설정된 환경 변수만으로는 반사계수의 변화를 충분히 설명하기 어려운 것으로 판단된다. 다만, 이번 실험에서 측



**Fig. 4.** Comparison of measured wave elevations at each wave gauge for a wave period of 1 s (N=240, L=60, D=25).



**Fig. 5.** Comparison of reflection coefficients by wave period for each vegetation density.

정된 반사계수는 수초 설치 밀도나 설치 길이 등 주요 환경 변수 조건에서 0.2를 초과하지 않는 매우 낮은 수준을 유지하였다. 이는 본 연구에서 사용된 유연한 인공 수초 군락이 대부분의 파랑 에너지를 반사시키지 않고, 수초 영역 내부에서 점성 감쇠, 난류 발생, 수초 자체의 운동에너지로의 전환 등으로 파랑 에너지를 효과적으로 소산 시킴을 의미한다.

#### 4.2 투과 및 소산 계수 비교

인공 수초 군락의 파랑 감쇠 성능을 직접적으로 나타내는  $K_T$ 와  $K_D$ 에 대한 각 환경 변수의 영향을 분석하였다. Fig. 6와 Fig. 7는 각각의 L에 대해서 VD 변화에 따른  $K_T$ 와  $K_D$ 의 각 주기별 변화를 나타낸다. 모든 설치 길이에 대해 수초 밀도가 증가할수록 투과계수  $K_T$ 는 감소하였고, 손실계수  $K_D$ 는 증가하는 경향이 뚜렷했다. 수초 밀도의 증가는 동일한 영역에서 수초의 밀집도가 높아짐을 의미하며 수초 개수의 증가를 나타낸다. 이는 파랑 에너지의 소산 원인이 되는 수초의 절대적인 개수(N) 증가로 이어지기 때문이다. 또한, 장주기파(장파장) 보다는 단주기파(단파장)일수록 투과계수가 감소하였다. 이는 파장이 길수록 더 큰 에너지를 가지기 때문에 그만큼 투과되는 에너지도 크다는 것을 나타낸다.

따라서 L이 상대적으로 짧은 조건(L=30 cm)에서는 동일한 VD를 적용하더라도 N이 부족하여 파랑 감쇠 효과가 낮게 나타났다(Fig. 6(a); Fig. 7(a)). 반면, L이 60 cm 이상으로 길어져서 동일한 밀도에서 더 많은 수초(N)가 배치되면 전체적인  $K_D$  성능은 눈에 띄게

향상되었다. 예를 들어, 동일한 밀도 VD=533.3 조건에서 L=30 cm 일 때 수초 개수 N은 48개이지만, L=90 cm에서는 N은 144개로 증가하며  $K_T$  값을 현저히 낮추었다. 이는 실질적인 파랑 감쇠 성능을 지배하는 주요 인자가 VD 보다는, 파가 진행하며 마주치는 절대적인 N임을 시사한다.

그러므로, 수초개수가 너무 적으면, 수초의 파랑 감쇠성능은 수초 구성과 입사파의 특성 보다 실제 수조에서 발생하는 입사파에 대한 부가적인 파랑 감쇠 등 실험 환경의 오차에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 예를 들어, Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)의 VD=533.3 (L=30 cm, N=48)에서는 각 주기에 따라 불규칙한  $K_T$ 와  $K_D$ 를 보인다. 반면, N이 충분한 조건인 VD=800.0 (L=90, 120)에서 N=216, 288에서는 파 주기별로 완만한  $K_T$ 와  $K_D$ 의 경향을 파악할 수 있다. 본 실험에서는 N이 충분히 확보된 VD=1600.0, L=120 cm 조건에서 가장 낮은 투과계수를 보여준다. 해당 조건에서는 장주기파에 대해서도 대체로 투과계수 0.2 이하의 매우 낮은 수준으로 안정적으로 유지되며 높은 파랑 감쇠 성능을 보였다. 이는 효과적인 파랑 감쇠 시스템을 설계하기 위해서는, 목표 파랑 조건에 대응하여 안정적으로 감쇠 성능을 발휘할 수 있는 임계 개수 이상의 N과 이를 물리적으로 수용할 수 있는 L를 함께 최적화하는 것이 필요함을 나타낸다.

앞선 분석을 통해 파랑 감쇠 성능이 수초의 절대적인 N에 영향을 받음을 확인하고, Fig. 8에서 동일한 수초 밀도(VD=1066.7) 조건에서 N의 변화에 따른 투과 및 소산 계수에 미치는 영향을 조사하였다. 동일한 VD 조건이라도 설치 길이 L이 늘어나 N이 증가하면

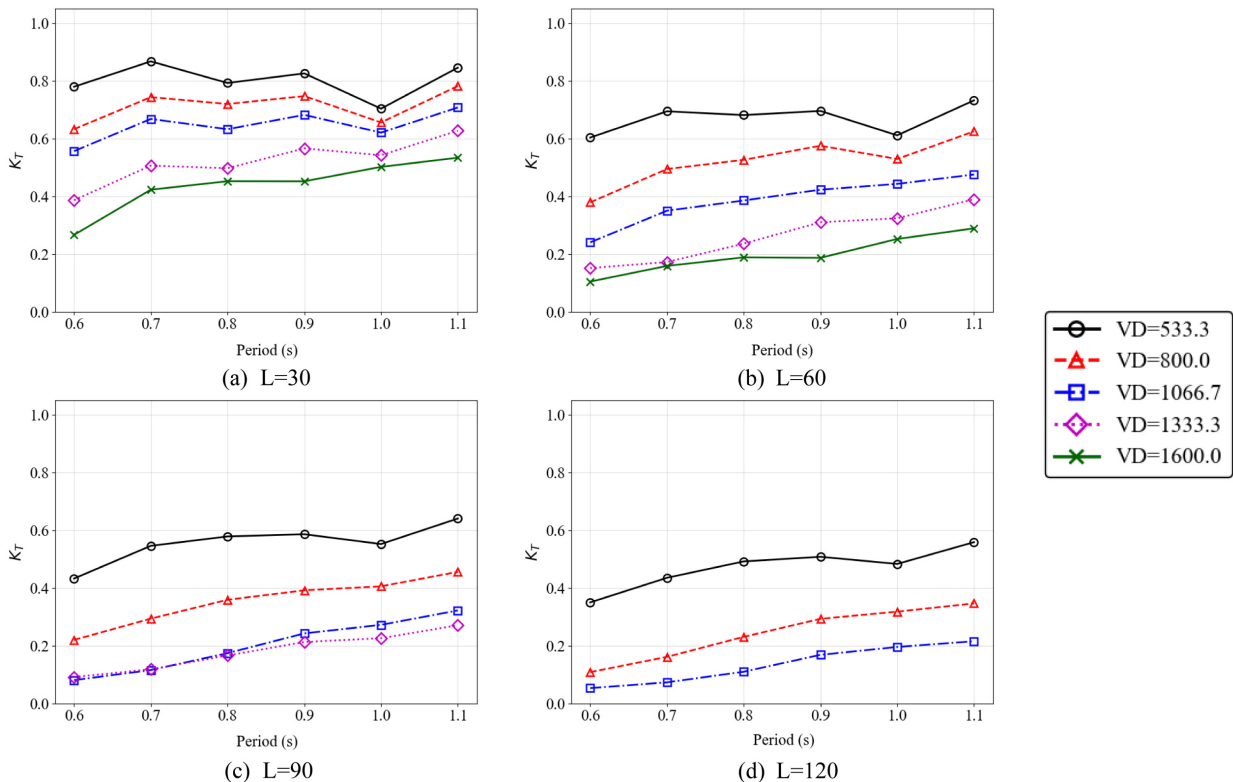


Fig. 6. Comparison of wave transmission coefficients at different frequencies for varying vegetation densities (D=25).

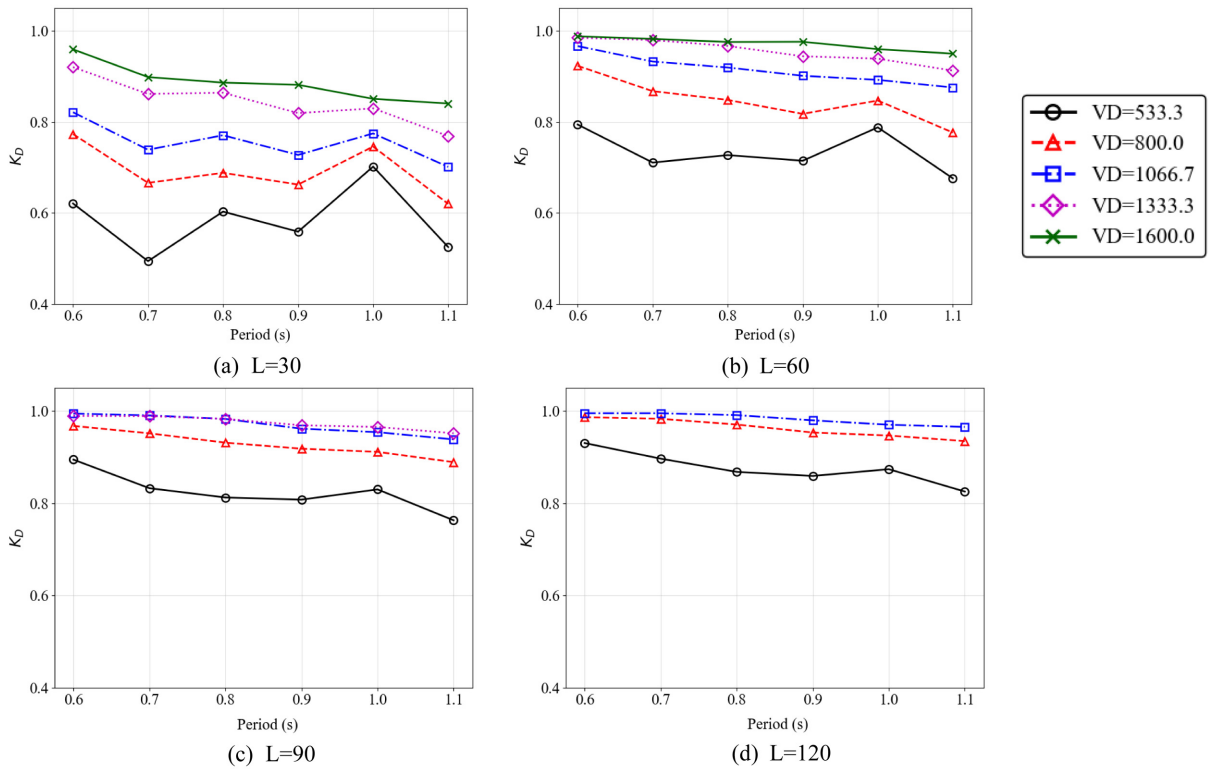


Fig. 7. Comparison of wave dissipation coefficients at different frequencies for varying vegetation densities ( $D=25$ ).

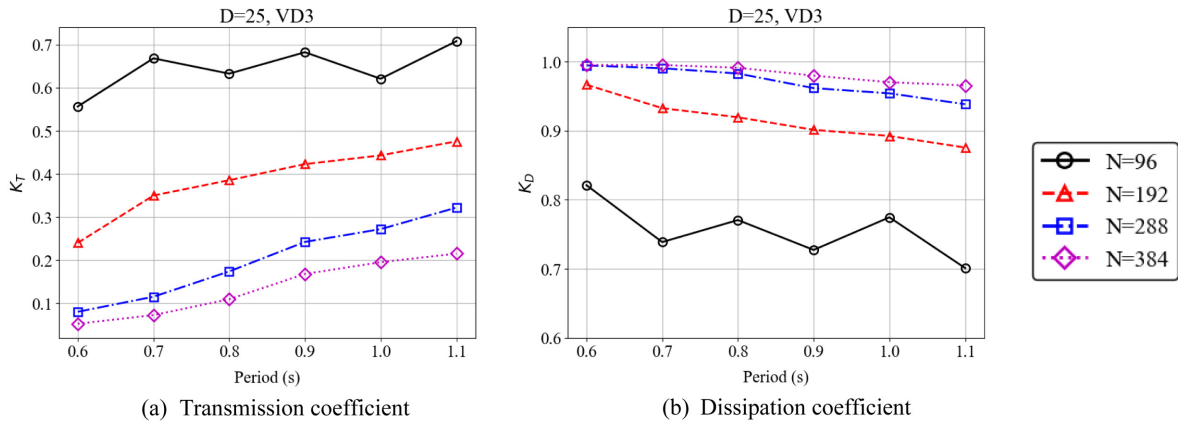


Fig. 8. Comparison of wave transmission and dissipation coefficients as a function of vegetation number under fixed density conditions.

$K_T$ 가 비울적으로 감소하였다. 이는 입사파가 통과하는 경로에 더 많은 물리적 장애물(수초)이 존재하게 되어 에너지 소산이 증대되기 때문으로 사료된다. 특히, 파랑 감쇠 효과가 안정적으로 나타나는 임계 수초 개수(threshold number of vegetation)가 존재한다. Fig. 8(b)에서 N이 96개 조건에서는 파 주기별 에너지 소산의 경향이 불규칙하게 나타나는 현상이 관찰된다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이, 수초의 영향보다는 이차원 조파수조 자체의 미세한 반사파 등 실험 환경의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다. 하지만 수초의 개수가 증가함에 따라 파 주기에 따른  $K_D$ 의 감소가 일정한 경향성을 가진다. 이후 N이 288개가 되면 이러한 외부 요인의

영향은 상쇄되고 수초에 의한 에너지 소산 효과가 지배적으로 작용하여 파 주기 변화에 따른 안정적이고 예측 가능한 감쇠 성능을 보였다. 이처럼 충분한 수초 개수가 확보된 조건에서는 장주기로 갈수록  $K_T$ 가 완만하게 증가하는 일관된 경향을 확인할 수 있었다. 따라서, 적절한 수의 유연한 인공 수초를 활용한 파랑 감쇠 기법은 공학적인 적용 가능성이 충분하다고 판단할 수 있다.

파랑 감쇠의 핵심 변수인 N과 L의 역할을 보다 명확히 구분하기 위해, 동일한 N과  $D=25$  cm 조건에서 L에 따른 투과 계수와 소산 계수를 Fig. 9에서 비교하였다. N=144 조건에서는 L이 작을수록 투과 계수가 작아지며, 이에 따라 손실 계수는 증가하였다. 반면에, N=288

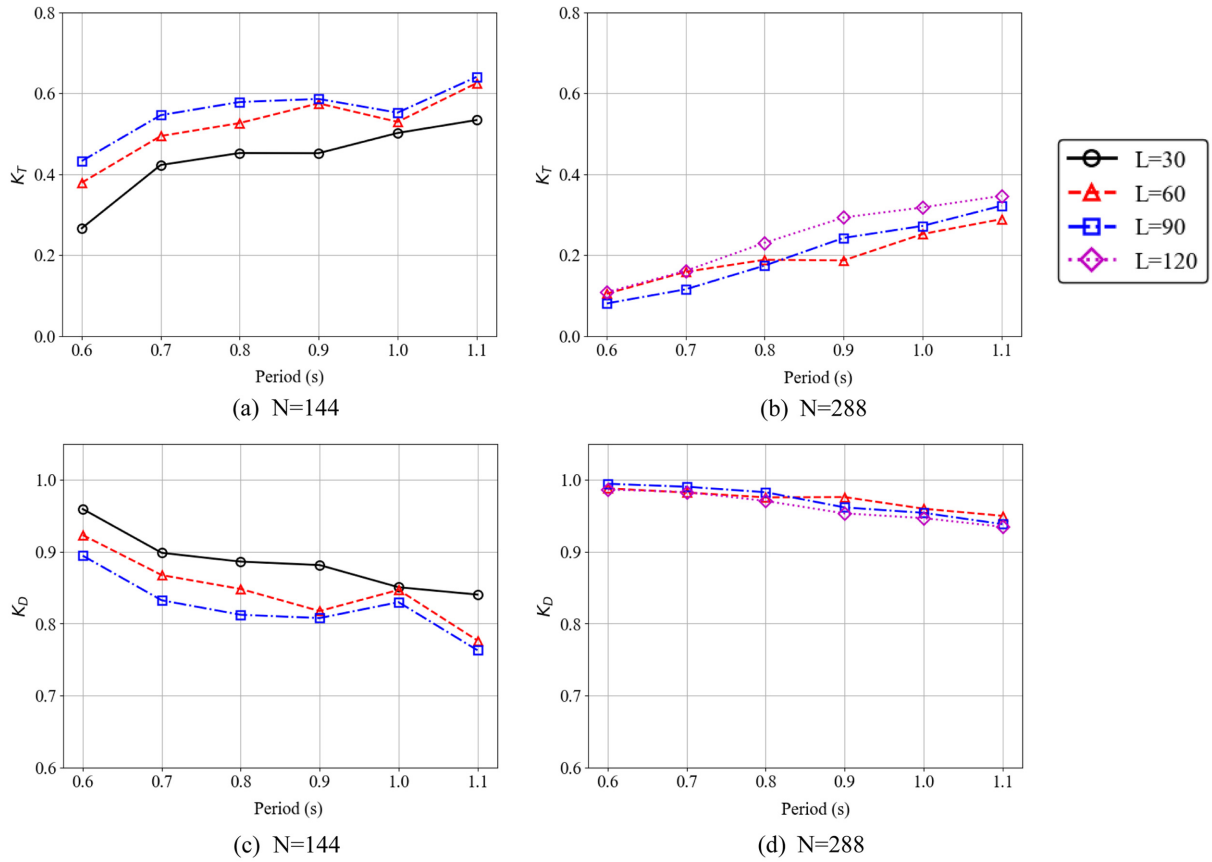


Fig. 9. Comparison of wave transmission and dissipation coefficients as a function of vegetation installation length under a fixed number of seagrass units.

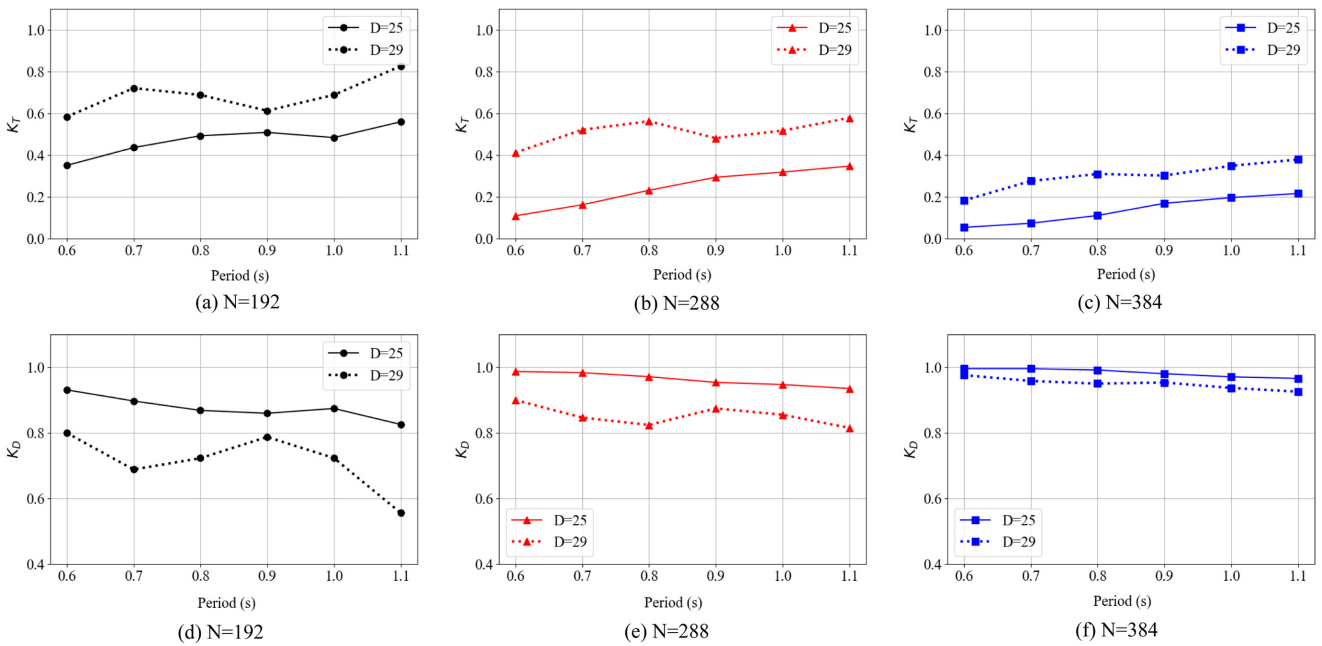


Fig. 10. Comparison of transmission and dissipation coefficients according to installation water depth for each vegetation number.

조건에서는 L의 변화에 따른 투과계수의 변화가 별로 없었다. 이는 앞에서 언급한 임계 수초 개수보다 적은 조건에서는 수초의 밀도

증가가 파랑 감쇠에 유리함을 의미한다. 하지만, Fig. 9(b)와 같이 수초 개수가 임계 수초 개수보다 많은 경우에는 설치 길이에 대한

파랑 감쇠 효과가 작다. 따라서, 효과적인 파랑 감쇠 성능을 위해서는 일차적으로 임계 수초 개수를 초과하는 충분한 수초 개수가 필요하며, 이를 파랑 환경에 맞게 적당한 설치 영역에 분포시키는 것이 중요하다.

파랑 감쇠의 변수 중 하나인  $D$ 가 파랑 감쇠 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해, 설치 길이( $L=120$  cm)를 고정하고 수심 변화에 따른 각 주기별 투과계수와 소산계수를 Fig. 10에서 비교하였다. 얇은 설치 수심( $D=25$  cm) 조건은 깊은 수심( $D=29$  cm) 조건보다 모든 수초 밀도(VD)에서 월등히 낮은 투과 계수를 보이는데, 이는 파랑의 운동 에너지가 자유수면 근처에 집중되어 있기 때문에 수초가 수면 가까이에 위치할 때 파 입자의 궤도 운동을 직접적으로 방해하고 에너지를 흡수하는 효과가 증가하는 것이다. 반면, 설치 수심이 깊어지면( $D=29$  cm) 수초 상단과 자유수면 사이의 거리가 멀어져 이러한 효과가 약화되고 많은 파랑 에너지가 수초 군락 위로 통과하여 투과율이 전반적으로 높아진다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이,  $N=192$  조건에서는 특정 파 주기에 대해 투과 계수의 변동이 관찰되었는데, 이는 안정적이고 일정한 파 감소 성능을 보장하는 임계 수초 개수에 미치지 못했기 때문으로 파악된다. 이런 현상은 수초 설치 수심이 깊은 조건에서 두드러졌다.

따라서, 효과적인 파랑 감쇠 시스템 설계를 위해서는 수초 개수 뿐만 아니라 설치 길이와 설치 수심의 상호 관계를 함께 최적화하는 것이 중요함을 확인하였다. 특히 자유수면 부근의 파랑 에너지를 최대한 소산시키는 배치 조건이 감쇠 성능을 좌우하는 핵심 요소임을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자연 수생 식물의 파랑 에너지 소산 기작을 모사한 유연한 인공 수초의 파랑 감쇠 성능을 이차원 조파 수조 실험을 통해서 분석하였다. 파 에너지의 보존 관계식과 수초 설치 영역 전후에서 측정된 파고에 대해 투과계수, 소산계수, 반사계수를 산정하였다. 실험 결과, 유연한 인공 수초 군락의 파랑 감쇠 성능을 결정하는 가장 지배적인 인자는  $N$ 과  $D$ 인 것으로 확인되었다. 또한, 파랑 감쇠 효과가 안정적으로 나타나는 임계 수초 개수가 존재함을 확인하였다. 만약, 수초 개수가 임계 개수보다 적으면, 파랑 감쇠 성능은 실험 환경의 오차 등에 지배적인 영향을 받으며, 오히려 수초의 설치 길이가 짧을수록(수초 밀도 증가) 파랑 감쇠에 유리하였다.

수초 군락에 의한 파랑 감쇠는 파랑의 반사보다는 군락 내부에서의 유체 저항과 난류 발생을 통한 에너지 소산에 기인하며, 반사계수는 대부분의 조건에서 0.2 이하의 낮은 값을 유지하였다. 특히, 파랑 에너지가 집중된 자유 수면 근처에 수초가 위치할수록(얇은 설치 수심  $D$ ), 그리고 임계치 이상의 충분한 수초 개수가 확보될수록 파랑 감쇠 효율이 극대화됨을 확인하였다. 그러므로, 효과적인 파랑 감쇠를 위해서는 파랑과 상호작용할 수 있는 수초의 물리적 총량을 충분히 확보하고 이를 수면에 가깝게 배치하는 것이 필요하다.

결론적으로, 본 연구는 실제 형상을 반영한 생체 모방적 인공 수

생식물을 적용하여 파랑 감쇠 성능을 정량적으로 평가하였다. 주요 환경 변수와 매개변수의 변화를 고려하여 파랑 에너지의 반사, 투과 및 소산 특성을 분석하였으며, 특히 임계 수초 개수와 설치 길이에 따른 감쇠 경향을 규명하였다. 이러한 결과는 자연기반 해법(NBS)을 적용한 하이브리드형 방파제 및 환경 친화적 연안-해양 구조물 보호 시스템 설계를 위한 공학적 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2025년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지속가능한 해양 신산업 인재 양성을 위한 해양공간·자원 활용 연구(RS-2025-02220608)). 또한, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00278157).

## References

- [1] Asano, T., Deguchi, H. and Kobayashi, N., 1992, Interaction between water waves and vegetation, in proc. of the 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., Venice, Italy, 2710-2723.
- [2] Augustin, L.N., Irish, J.L. and Lynett, P., 2009, Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation, *Coast. Eng.*, 56(3), 332-340.
- [3] Chen, H., Ni, Y., Li, Y., Liu, F., Ou, S., Su, M., Peng, Y., Hu, Z., Uijtewaal, W. and Suzuki, T., 2018, Deriving vegetation drag coefficients in combined wave-current flows by calibration and direct measurement methods, *Adv. Water Resour.*, 122, 217-227.
- [4] Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. and Hwang, P.A., 1984, Wave diffraction due to areas of energy dissipation, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 110(1), 67-79.
- [5] Dubi, A. and Tørum, A., 1997, Wave energy dissipation in kelp vegetation, in proc. of the 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando, FL, USA, 2626-2639.
- [6] Elwany, M.H.S., O'Reilly, W.C., Guza, R.T. and Flick, R.E., 1995, Effects of southern california kelp beds on waves, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 121(2), 143-150.
- [7] Goda, Y. and Suzuki, Y., 1976, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, in proc. of the 15th Int. Conf. on Coastal Eng., Honolulu, HI, USA, 828-845.
- [8] Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Perrette, M., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J. and Levermann, A., 2014, Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 111(9), 3292-3297.
- [9] Hu, Z., Suzuki, T., Zitman, T., Uijtewaal, W. and Stive, M., 2014, Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow, *Coast. Eng.*, 88, 131-142.
- [10] IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC,

Geneva, Switzerland.

- [11] Jadhav, R.S., Chen, Q. and Smith, J.M., 2013, Spectral distribution of wave energy dissipation by salt marsh vegetation, *Coast. Eng.*, 77, 99-107.
- [12] Kittinger, J.N. and Ayers, A.L., 2010, Shoreline Armoring, Risk Management, and Coastal Resilience Under Rising Seas, *Coast. Manage.*, 38(6), 634-653.
- [13] Kobayashi, N., Raichle, A.W. and Asano, T., 1993, Wave attenuation by vegetation, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 119(1), 30-48.
- [14] Koftis, T., Prinos, P., Stratigaki, V., Manca, E. and Lara, J.L., 2013, Wave damping over artificial *Posidonia oceanica* meadow: A large-scale experimental study, *Coast. Eng.*, 73, 71-83.
- [15] Losada, I.J., Maza, M. and Lara, J.L., 2016, A new formulation for vegetation-induced damping under combined waves and currents, *Coast. Eng.*, 107, 1-13.
- [16] Løvås, S.M. and Tørum, A., 2000, Effect of submerged vegetation upon wave damping and run-up on beaches: A case study on *Laminaria Hyperborea*, in *proc. of the 27th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Sydney, Australia, 851-864.
- [17] Lynett, P.J., An, G.L. and Smith, J.M., 2009, The effective use of physical model tests in the validation and confirmation of numerical models for coastal and hydraulic applications, *J. Coast. Res.*, SI 56, 224-228.
- [18] Mazda, Y., Wolanski, E., King, B., Sase, A., Oshitani, D. and Alongi, D.M., 2006, Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp., *Wetl. Ecol. Manag.*, 14, 365-378.
- [19] Mendez, F.J. and Losada, I.J., 2004, An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields, *Coast. Eng.*, 51(2), 103-118.
- [20] Mendez, F.J., Losada, I.J. and Losada, M.A., 1999, Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field, *J. Geophys. Res. Oceans*, 104(C8), 18383-18396.
- [21] Mork, M., 1996, The effect of kelp in wave damping, *Sarsia*, 80(4), 323-327.
- [22] Morris, R.L., Konlechner, T.M., Ghisalberti, M. and Swearer, S.E., 2018, From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence, *Glob. Change Biol.*, 24(5), 1827-1842.
- [23] Petrone, M. and L'vov, Y., 2004, Numerical Solution of Fully Developed Flow with Vegetative Resistance, *J. Fluids Eng.*, 126(3), 390-396.
- [24] Sánchez-González, J.F., Sánchez-Rojas, V. and Memos, C.D., 2011, Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows, *J. Hydraul. Res.*, 49(4), 503-514.
- [25] Seelig, W.N. and Ahrens, J.P., 1981, Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters, CERC-TP-81-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- [26] Stankovic, M., Mishra, A.K., Rahayu, Y.P., Lefcheck, J., Murtiyarso, D., Friess, D.A. and Prathep, A., 2023, Blue carbon assessments of seagrass and mangrove ecosystems in South and Southeast Asia: Current progress and knowledge gaps, *Sci. Total Environ.*, 905, 166618.
- [27] Stephan, U. and Gutknecht, D., 2002, Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, *J. Hydrol.*, 269(1-2), 27-43.
- [28] Suh, K.D., Lee, C. and Park, W.S., 2001, Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes, *Coast. Eng.*, 43(3-4), 169-180.
- [29] UNEP, 2005, 2005 Annual Evaluation Report, United Nations Environment Programme.
- [30] Velasco, D., Bateman, A., Redondo, J.M. and Medina, V., 2003, An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings, *Flow Turbul. Combust.*, 70(1), 69-88.

---

Received 5 January 2026

Revised 14 February 2026

Accepted 22 February 2026