

연안 습지식생에 의한 파랑감쇠 특성

이성대[†]

한라대학교 토목공학과

Characteristics of Wave Attenuation with Coastal Wetland Vegetation

Seong-Dae Lee[†]

Dept. of Civil Engineering, Halla Univ, Wonju, Korea

(Received: 20 November 2015, Revised: 04 February 2016, Accepted: 04 February 2016)

요약

해양과 육지 사이에 있는 연안습지는 연안의 수질을 개선하고 다양한 생물의 자연적인 서식처로 이용될 뿐 아니라 연안침식을 억제하는 기능을 가지고 있다. 연안식생은 외해에서 입사하는 파에너지 또는 폭풍해일을 감소하며 해저 안정화를 통해 습지를 유지하는 기능을 가지고 있다. 식생에 의한 파랑감쇠의 특성을 위해서는 식생과 파랑의 역학적 과정의 검토가 필수적이며 이를 통해 연안과정이나 연안의 동수역학적 특성을 이해할 수 있다. 본 연구에서는 파랑조건 이외에 식생형태에 따른 파랑감쇠 특성을 정량화하기 위해 수리실험을 통해 검토하였으며, 식생모형은 강성식생을 대상으로 규칙파가 작용하는 경우에 대해 파악하였다. 파형경사 ak 와 상대수심 kh 에 따른 수면위로 돌출된 식생에 대한 파랑감쇠를 검토하기 위하여 수리실험과 수치해석을 수행하였다. 실험결과에 대한 파고감쇠는 Dalrymple et al.(1984)의 파고감쇠식을 통해 식생에 의한 파고전달율, 감쇠율 및 항력계수를 해석하였다. 실험결과 식생에 작용하는 항력계수는 Reynolds수 보다는 Keulegan-Carpenter 수와 상관성이 있고, 파형경사가 증가할수록 파고감쇠율이 증가하고 있음을 확인하였다.

핵심어 : 강성식생, 수리실험, 수치해석, 연안습지, 파랑감쇠

Abstract

As a transition region between ocean and land, coastal wetlands are significant ecosystems that maintain water quality, provide natural habitat for a variety of species, and slow down erosion. The energy of coastal waves and storm surges are reduced by vegetation cover, which also helps to maintain wetlands through increased sediment deposition. Wave attenuation by vegetation is a highly dynamic process and its quantification is important for understanding shore protection and modeling coastal hydrodynamics. In this study, laboratory experiments were used to quantify wave attenuation as a function of vegetation type as well as wave conditions. Wave attenuation characteristics were investigated under regular waves for rigid model vegetation. Laboratory hydraulic test and numerical analysis were conducted to investigate regular wave attenuation through emergent vegetation with wave steepness ak and relative water depth kh . The normalized wave attenuation was analyzed to the decay equation of Dalrymple et al.(1984) to determine the vegetation transmission coefficients, damping factor and drag coefficients. It was found that drag coefficient was better correlated to Keulegan-Carpenter number than Reynolds number and that the damping increased as wave steepness increased.

Key words : Coastal Wetlands, Laboratory Hydraulic Test, Numerical Analysis, Rigid Vegetation, Wave Attenuation

1. 서론

최근 연안 습지가 가지고 있는 가치가 재인식되고 있으며, 특히 이들 습지공간은 양서류, 갑각류, 곤충류 및 조류나 야생동물의 서식처로 이용되고 있다. 그리고, 갈대군락 및 해조류와 같은 다양한 연안 습지식생 군락은 연안의 수

질을 개선하고 어류의 산란지 역할을 할 뿐 아니라 아름다운 자연 경관을 제공하고, 흐름을 저감하여 습지를 안정화하는 것으로 알려져 생물 다양성의 보존 측면에서 매우 중요하게 인식되고 있다(Asano, 2006). 또한 연안식생은 해변(sand beach)의 침식 및 세굴을 억제하는 기능을 가지고 있을 뿐 아니라 식물의 줄기나 뿌리의 기능을 통해 해안선의 전진(퇴적)이나 해저지형을 안정화하는 역할을 하고 있으나, 지금까지는 이같은 습지의 중요성과 기능에 대한 인식이 부족하여 미국의 경우 매년 300~400 km^2 에 달하는

[†] To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Civil Engineering, Halla Univ, Wonju, Korea
E-mail: sdlee@halla.ac.kr

습지가 사라지고 있는 것으로 조사되고 있다(EPA, 2007). 그러나 최근에는 이같은 연안 습지식생의 가치가 재인식됨에 이들 습지를 보전하고 회복하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며 지속가능한 연안습지 생태계의 유지를 위한 전략수립의 필요성이 대두되고 있다(Ondiviera et al. 2014).

연안 습지식생은 외해로부터 내습하는 파랑에너지, 폭풍해일 및 지진해일(쓰나미) 등의 자연재해를 경감하고, 다양한 레크리에이션 활동장으로도 이용되며, 외해에서 입사하는 에너지를 감쇠하여 배후지를 보호하는 등 연안방재 및 환경의 측면에서도 주목을 받고 있다. 최근 지구규모의 기후변화에 따른 해수면 상승과 연안해역이 산업화 및 도시화됨에 따라 이들 지역이 자연재해에 점차 취약해지는 특성을 보이고 있으며, 이에 따라 연안 식생이 어떻게 외해에서 입사하는 파랑에너지를 감쇠하고, 폭풍해일에 의한 재해를 억제하는지를 이해하고 예측하는 연구가 관심의 대상이 되고 있다(Mitch and Gosselink, 2000). 우리나라의 경우 2003년 14호 태풍인 매미(Maemi) 및 2006년 10월 동해안에 내습한 너울성 고파랑에 의한 폭풍해일의 피해가 발생하였으며, 1983년과 1993년에는 동해중부의 지진해일에 의해 강원도 임원항 일대에 피해가 발생하기도 하였다. 최근 지구규모의 기후변화에 따른 해수면 상승이라는 새로운 해상 환경변화가 예상되면서 폭풍 및 지진 해일에 의한 연안재해 발생의 빈도 및 규모 증가가 나타나고 있고, 해안선 매립 및 연안습지의 감소에 따른 연안재해의 위험성 또한 증가되고 있는 실정이다. 특히 2004년 인도양에서 발생한 지진해일과 2011년 일본 동북지방 지진해일의 재해가 연안습지 식물인 맹그로브나 해안림 군락지에서 최소화 되었다는 조사보고에 따라 연안방재의 측면에서 연안습지 식생의 가치가 재조명되고 있다 (Selvam, 2005; Teramoto et al. 2012).

연안식생에 의한 파랑감쇠 특성에 관해서는 다양한 이론적, 실험 및 수치적 연구가 있으며, 이론적 연구는 식생을 강성의 연직실린더가 수면위로 돌출한 것으로 가정하여 파에너지의 감쇠 해석을 시도하였다(Dalrymple et al., 1984; Kobayashi et al., 1993; Asano et al., 1992; Dubi and Torum, 1995). 식생에 의한 파랑감쇠의 이론 모형은 식생에 작용하는 선형파를 가정하여 적용하였으며, Dalrymple et al. (1984)은 파랑감쇠를 에너지 보존법칙을 통해 해석하였고, Kobayashi et al. (1993)는 운동량보존방정식을 통해 이론해를 제안하였다. 또, Asano et al. (2005)는 강성식생에 작용하는 장주기 파랑의 감쇠를 위해 에너지보존과 운동량 보존개념을 적용한 이론적 해석을 제안하였으며, Mendez and Losada (1999)는 Kobayashi et al. (1993)의 이론해를 불규칙파로 확장하여 해석하였으며, Riffe et al. (2011)는 연안습지 식생대내의 파고 관측자료와 이론 해석 결과를 비교하여 타당성을 검토하였다.

파랑과 식생 사이의 특성을 해석하는 경우 이들 상호작용에 따른 복잡성 때문에 이론적 접근 보다는 수치적 해석이

요구된다. 파랑-식생의 상호작용에 관한 수치해석은 시간 및 공간규모, 난류문제 및 식생특성을 모형화하는 것이 어렵고 특히 식생을 세부적으로 묘사하는 것은 수치계산의 측면에서 비효율적이기 때문에 이를 단순화하여 해석하기 위한 수치모형이 적용되었다. Asano et al.(2006)는 식생대 구간을 마찰항과 항력항으로 구분하여 해석한 비정상완경사 방정식 모형을 개발하였으며, Boussinesq 방정식 모형에 마찰항을 고려한 수치해석법(Zou et al. 2013) 그리고 Suzuki et al.(2011)은 스펙트럼모형인 SWAN에 Mendez and Losada(1999)의 이론모형을 결합한 수치모형이, 최근에는 RANS 방정식에 기초한 비정상수압 모형(Ma et al. 2013) 등이 개발되는 등 파랑-흐름-식생의 관계를 해석하기 위한 다양한 수치기법이 제안되고 있다.

또한 Augustin et al. (2009)는 연안식생이 수면위로 돌출하거나 수면부근에 있는 경우 강성 및 연성 식생에 의한 파랑감쇠특성을 수리실험을 통해 연구하였으며 Reynolds 수 R_e 와 Keulegan-Carpenter수 KC 로부터 식생에 작용하는 항력계수 C_D 를 검토하였다. 그리고 식생에 의한 파에너지 손실을 파악하기 위해 바닥마찰항을 수정한 Boussinesq 방정식을 기반으로 한 시간의존 파랑전파모형으로 실험 결과와 비교하였으며, Hu et al.(2014)은 파랑-흐름-식생이 공존하는 경우 식생밀도 및 식생의 크기 등에 의한 파랑변형특성을 수리실험을 통해 검토하였으며 이를 통해 항력계수의 변동특성을 Reynolds수의 관점에서 토의하였다. 또한 Zeller et al.(2014)는 파랑-식생에 의한 파에너지 저감을 수리실험을 통해 항력계수는 KC 와 상관관계가 높음을 확인하였다.

본 연구에서는 균일한 밀도의 강성식생이 일정수심 상에 있는 경우에 입사파 조건에 따라 식생에 의한 파랑감쇠의 변화 특성을 수리실험을 통해 검토하는 것이다. 이를 위해 파랑조건은 파형경사 ak 와 상대수심 kh 가 변화하는 경우에 대해 파랑에너지 감쇠율 및 파고 전달율의 관점에서 해석하였다. 그리고 이를 통해 식생에 미치는 항력계수 C_D 와 Reynolds수 R_e 및 Keulegan-Carpenter수 KC 의 관계를 검토하여 명확히하였다. 또, 비정상 완경사방정식 수치모형을 적용하여 수리실험 결과와의 비교 검토를 행하였으며 이를 통해 식생에 의한 파랑감쇠 특성을 해석하는데 수치모형의 적용성을 검토하였다.

2. 수리실험

2.1 실험장치 및 방법

식생에 의한 파랑감쇠 특성을 검토하기 위한 수리실험은 미국 Oregon 주립 대학교의 길이 626 cm, 높이 32 cm, 폭 10.4 cm의 2차원 단면 조파수로에서 수행되었다. 조파수조는 피스톤형식 조파장치를 통해 규칙파, 불규칙파 및 고립파의 발생이 가능하며, 수조의 하류측 끝부분에는 반사파를 최소화하기 위해 경사투과제를 사용한 소파장치를 설치



Fig. 1. Installed vegetation bed

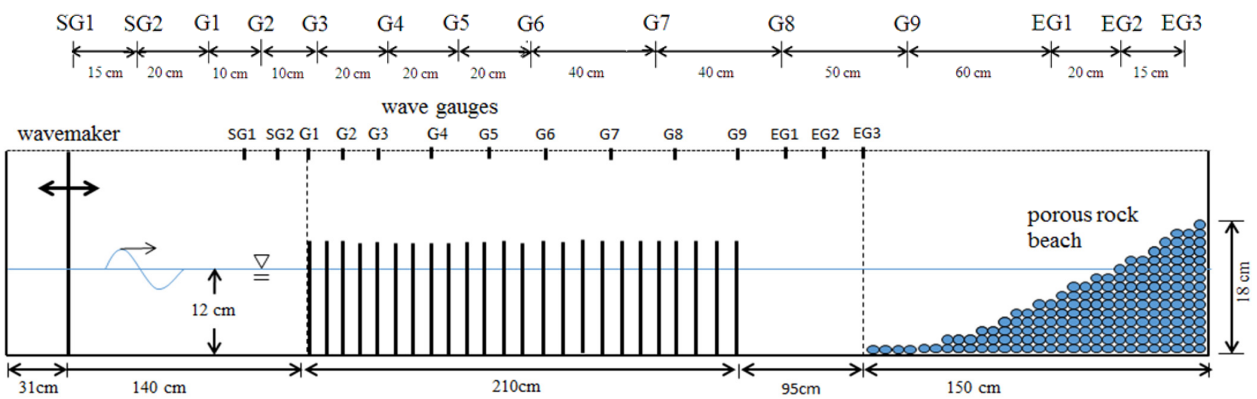


Fig. 2. Cross section of the wave flume and physical model setup. The SG (1-2), G (1-9) and EG (1-3) are the locations of the wave gauges

하였다. 본 수리실험에서는 일정수심의 해역에 수면위로 돌출한 균일한 밀도의 식생군이 있는 경우 입사파에 따른 파랑감쇠 특성을 조사하였다. 일반적으로 연안 습지식생은 해초류(seaweed, Kelp)와 같은 연성식생과 맹그로브(mangrove)와 같은 강성식생으로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 갈대나 호화미초(*Spartina alterniflora*)와 같은 강성식생을 대상으로 폴리에틸렌 소재를 사용하여 식생모형을 제작하였다. 식생에 의한 파랑감쇠 특성을 검토하기 위한 수리실험은 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 1(a)는 조파수조의 측면도를 그리고 Fig. 1(b)는 평면도를 나타내었다.

실험하는 동안 입사파에 의한 모형식생의 이동이 발생하지 않도록 모형식생과 바닥을 고정, 일치시켰다. 실험에 수행된 식생모형은 직경 6.4 mm, 식생밀도는 1,311 stems/m²이며 Fig. 1(b)에서 처럼 삼각 교호형태로 균일하게 배치하였다. 식생 모형은 연안 염습지에 분포되어 있는 강성식생을 대상으로 하였으며 염습지의 강성식생은 성장하면서 식생의 해저부근에 퇴적물을 축적하여 습지를 안정하게 하는 특성을 가지고 있다. 특히 현장조사 결과에 따르면 호화미초와 같은 연안식생은 상대적으로 강성이고, 식생 직경은 5~10 mm 내외이며 식생높이는 30~240 cm정도 이고, 식생 밀도는 1,107~1,504 stems/m²인 것으로 알려져 있다(Bergen et

al., 2000).

실험수심은 12 cm로 일정하게 유지하였고 수면위로 돌출한 식생에 의한 파랑감쇠 특성을 조사하기 위해 모형 식생은 14 cm가 되도록 하여 정수면상 2 cm가 돌출하도록 하였다. 입사파는 수치실험 결과와 비교·검토하기 위하여 규칙파를 사용하였으며 실험파 조건은 Table 1에 각각 나타내었다. 그리고 실험파는 초음파식 파고계(acoustic wave meter ; Banner Engineering S18U)로 측정하였으며, 측정위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 식생대 전면 2개소 그리고 식생대 내에서 9개소 그리고 식생대 배후 3개소이며 식생대 전면 위치에 위치한 SG1, SG2는 입사파 및 식생대에 의한 반사파를 그리고 식생대 배후의 EG1, EG2 및 EG3에서는 조파수조 하단부의 반사파를 측정하였으며 SG 및 EG에서의 반사파 측정 결과는 Table 2에 나타내었다. 그리고 식생대내부 영역에서는 위치에 따른 지수함수를 고려하여 식생대 경계에서부터 0, 10, 20, 40, 60, 80, 120, 160 및 210 cm 등 9측점에서 각각 관측하였다.

식생부의 전면(SG) 및 조파수조의 하류측 끝단(EG)에서 측정된 반사파 결과는 Table 2에 나타내었으며, 이때 일정수심 $h = 12$ cm에 대해 입사파주기 $T = 0.6$ sec 그리고 $H = 1.27$ cm 인 경우 10회의 실험을 통해 평균한 값을 나타내었다. 표에서

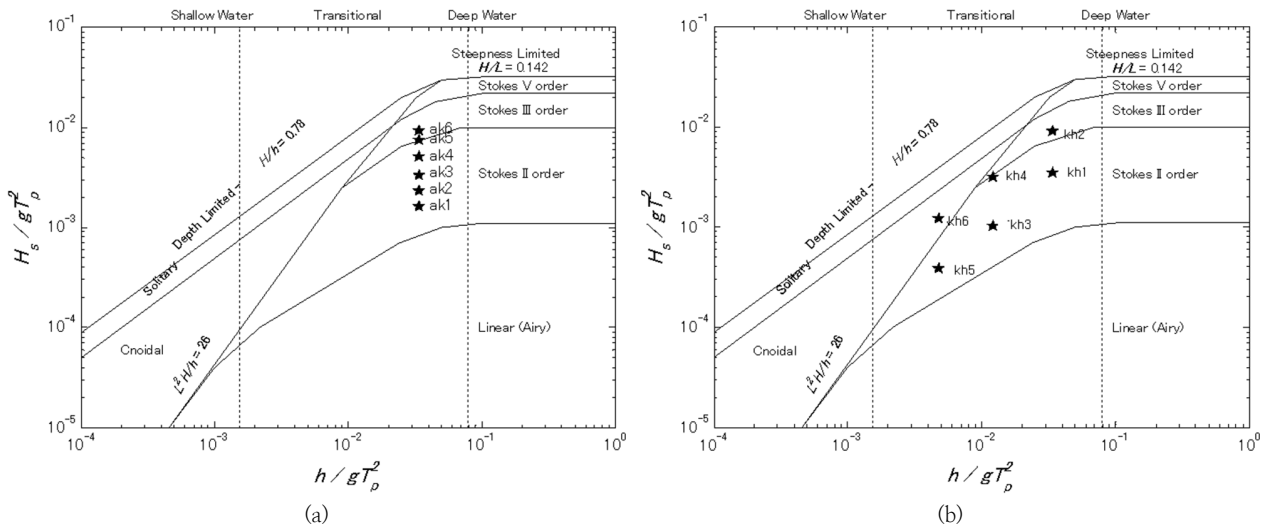


Fig. 3. Wave steepness plotted as a function of relative water depth for test matrix following Le Mehaute(1969). (a) wave conditions for wave steepness (ak) and (b) wave conditions for relative water depth (kh)

Table 1. Experimental wave conditions

CASE No.	h (cm)	T (s)	H (cm)	kh	ak	R_e	KC
$ak1$	12	0.6	0.57	1.49	0.04	211	3
$ak2$	12	0.6	0.81	1.49	0.05	300	4
$ak3$	12	0.6	1.18	1.49	0.07	437	6
$ak4$	12	0.6	1.78	1.49	0.11	660	9
$ak5$	12	0.6	2.66	1.49	0.16	986	14
$ak6$	12	0.6	3.25	1.49	0.20	1205	17
$kh1$	12	0.6	1.22	1.49	0.08	452	6
$kh2$	12	0.6	3.15	1.49	0.20	1168	17
$kh3$	12	1.0	1.01	0.75	0.03	319	8
$kh4$	12	1.0	3.07	0.75	0.10	971	23
$kh5$	12	1.6	0.97	0.45	0.02	288	11
$kh6$	12	1.6	3.07	0.45	0.06	914	35

Table 2. Reflection coefficient measured in SG and EG

h (cm)	T (s)	H (cm)	K_r (SG)	K_r (EG)
12	1.6	1.27	0.08	0.02

보듯이 식생에 의한 반사계수 K_r (SG)= 0.08 그리고 조파수조 끝단에서는 K_r (EG)=0.02으로 상대적으로 미소하여 이의 영향은 무시하였다.

수리실험안은 파형경사 ak 와 상대수심(무차원파수) kh 에 따른 파고감쇠의 특성을 파악하기 위해 파형경사에 대해서는 6개 그리고 상대수심에 대해서는 6개 등으로 총 12개의 실험안으로 수행하였다. Table 1에 a 는 진폭(=H/2) 그리고 k 는 파수이다. Fig. 3에는 Le Mehaute(1969)의 상대수심에 대한 파형경사의 관계에 따른 파랑분류도에 따라 실험파랑의 특성을 도시하였다. 그림에서 보듯이 Fig. 3(a)는 파랑분류도에 파형경사(ak)에 따른 특성을 그리고 Fig. 3(b)는 상대수심(kh)에 대해 나타내었다. 이들 각 실험안에 대한 파랑의 특성은 그림에서 보듯이 상대수심과 파형경사에 대한 파랑분류 특성상 $ak1$ 은 선형파 부근이며 $ak6$ 으로 갈수록

비선형성에 가까워지며, $kh1$ 은 심해역 부근이며 $kh6$ 로 갈수록 천해역 부근을 의미하고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 파형경사 ak 의 변화에 따른 경우 $ak1$ 은 선형파에 가까운 Stoke 2차파이며 $ak5$, $ak6$ 은 Stoke 3차파에 해당한다. 또, 상대수심 kh 에 대해 Fig. 3 (b)에서 알 수 있듯이 중간수심파에 해당하며 $kh1$, $kh2$ 는 심해파 그리고 $kh5$, $kh6$ 는 천해파에 가까운 중간수심파로 분류되며, $kh6$ 은 Le Mehaute(1969)의 파랑분류표에 따르면 비선형파인 Cnoid파에 해당한다. 그리고, 각 실험안에 대해 수중 식생에 작용하는 파랑에 의한 흐름으로부터 Reynolds수 (R_e)를 얻었으며, R_e 는 200~1,200의 범위에 있다.

$$R_e = \frac{ud}{\nu} \tag{1}$$

여기서, ν 는 물의 동점성계수, d 는 특성길이이며 여기서는 식생 직경, u 는 선형파이론으로부터 얻어진수평속도성분을 나타낸다.

그리고 원형 식생주위의 파랑이 작용하는 경우 다음 식 (2)와 같은 Keulegan-Carpenter수 (KC)는 진동류 하에서 관성력에 대한 항력의 중요성을 나타내기 위해 적용되며 본 실험에서는 KC 는 3~35의 범위에 있다.

$$KC = \frac{uT}{d} \tag{2}$$

2.2 실험결과

식생과 파랑사이의 상호작용은 식생의 공간적인 분포나 파랑의 특성에 따라 복잡하게 나타난다. 연안습지는 다양한 크기의 식생과 불균일한 분포로 이루어져 있다. 연안식생은 파랑이나 흐름 등의 외력에 상대적으로 강한 강성식생과 쉽게 변동하는 연성식생들로 분포된다. 이들 자연식생은 시간에 따라 성장하며 계절에 따라 주기적으로 변화한다. 따라서 이같은 복잡한 식생-파랑의 상호작용을 이론적으로 검토하기 위해서는 일반적으로 식생의 단순화가 요구되며 이를 위해 식생대는 공간적으로 균일하게 분포되어 있고, 식생은 강성으로 가정하여 연직 원형 실린더군으로 배열되어 있는 것으로 한다.

Dalrymple et al.(1984)은 일정수심의 해역에 있는 강성의 식생군을 원형 실린더군이 배열되어 있는 것으로 가정하여 선형파 전파에 따른 파에너지 전달계수를 에너지보존 관계로부터 다음과 같이 나타내었다.

$$K_v(x) = \frac{H(x)}{H_0} = \frac{1}{1 + \alpha x} \tag{3}$$

여기서, $K_v(x)$ 는 식생대내 위치 x 에서 전달계수, $H(x)$ 는 위치 x 에서 파고, H_0 는 입사파고이며, α 는 파고감쇠율이다. 그리고 α 는 규칙파인 경우 다음과 같다(Augustin et al, 2009; Ozeren et al., 2014).

$$\alpha = \frac{4}{9\pi} H_i C_D N D k \frac{\sinh^3 ksh + 3 \sinh ksh}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} \tag{4}$$

식생대에 의한 전달계수 K_v 가 실험으로부터 얻어지면 식 (3) 및 식(4)에 의해 파고감쇠율 α 와 항력계수 C_D 를 구할 수 있다.

일반적으로 연직실린더 구조물에 파랑이 내습하는 경우 항력계수 C_D 가 중요하며, 이때 단일실린더에 작용하는 항력계수 C_D 는 Reynolds 수 R_e 와 함수관계에 있는 것으로 알려져 있고(Nepf, 1999), 연직실린더 군으로 가정한 연안 식생이 있는 경우 항력계수 C_D 는 식생의 밀도나 식생상호간의 작용에 따라 Reynolds 수 R_e 와 Keulegan-Carpenter 수(KC)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Sarpkaya and Issacson, 1981; Blackmar et al, 2014).

실험결과로부터 얻어진 파고감쇠율 α 와 파형경사 ak 의 관계에 대해서는 Fig. 4에 그리고 항력계수 C_D 와 Reynolds 수 R_e 및 Keulegan-Carpenter 수 KC 에 대해서는 Fig. 5

및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그림에서 파형경사 ak , R_e 및 KC 에 대한 α 및 C_D 는 식생대 내부에서 측정된 파고로부터 얻은 것들이다.

Fig. 4는 파형경사 ak 에 대한 파고감쇠율 α 에 대한 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 파형경사 ak 가 증가할수록 거의 선형적으로 파고감쇠율 α 또한 증가하고 있다. 파형경사는 Fig. 3에서 보듯이 파랑의 선형성 및 비선형성을 나타내는 지표이며, 파형경사가 작을수록 선형파에 그리고 클수록 비선형파에 접근한다. 따라서 본 실험결과 비선형파로 갈수록 식생에 의한 파고감쇠율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 각 측정위치 G2~G9에 대한 파고감쇠율의 특성을 도시하였으며 결과에서 보듯이 식생대내의 측정위치 x 와는 상관없이 전체적으로 ak 의 증가에 따라 α 또한 증가하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 Reynold 수 R_e 에 대한 C_D 의 변동특성에 대해 도시하였다. 실험결과, 그림에서 보듯이 R_e 가 증가할수록 C_D 는 전체적으로 감소하고 있음을 알 수 있으며, 동일한 R_e 에 대해 C_D 의 변동이 크게 나타나 상관관계가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 본 실험에서는 조파수조의 한계에 따라 R_e 의 범위가 200~1,200이하에 대해 검토하였으며

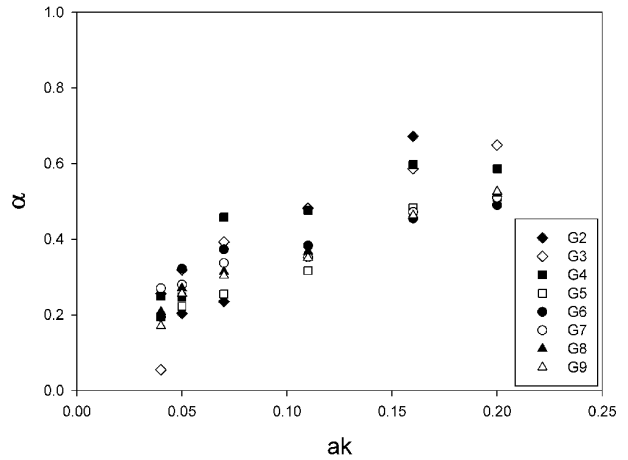


Fig. 4. Damping factor α with wave steepness ak

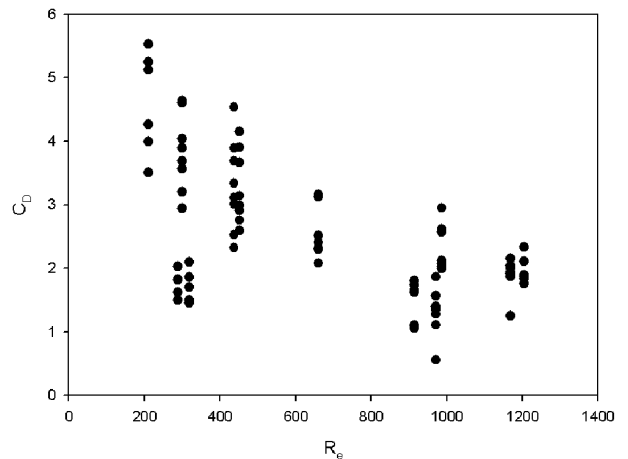


Fig. 5. Comparison of drag coefficient C_D with R_e

이때 C_D 는 0.5~6.3의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 본 연구와 유사한 조건하에서 얻어진 결과와 매우 유사하며(Anderson and Smith, 2014), 상대적으로 대형조파수조의 $R_e > 2,000$ 에 대한 실험에서는 $C_D < 1.0$ 이하로 점차 완만히 감소하는 특징을 보이는 것으로 나타났다(Augustin et al, 2009).

Fig. 6에는 Keulegan-Carpenter 수 (KC)에 따른 C_D 의 결과를 도시하였으며, KC 가 증가함에 따라 C_D 가 지수함수적으로 감소하고 있음을 보이고 있다. Fig. 5의 $R_e - C_D$ 의 결과에 비해 $KC - C_D$ 의 상관관계가 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 이를 통해 본 실험결과 연안 식생에 작용하는 항력계수는 Reynolds수 R_e 보다는 상대적으로 Keulegan-Carpenter 수(KC)의 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 $KC < 40$ 및 $R_e < 2,000$ 에 대해 제한적으로 검토된 것이며, $KC > 40$ 및 $R_e > 2,000$ 인 경우에 대해서는 지속적인 실험연구를 통해 $R_e - KC - C_D$ 의 관계를 보다 명확히 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

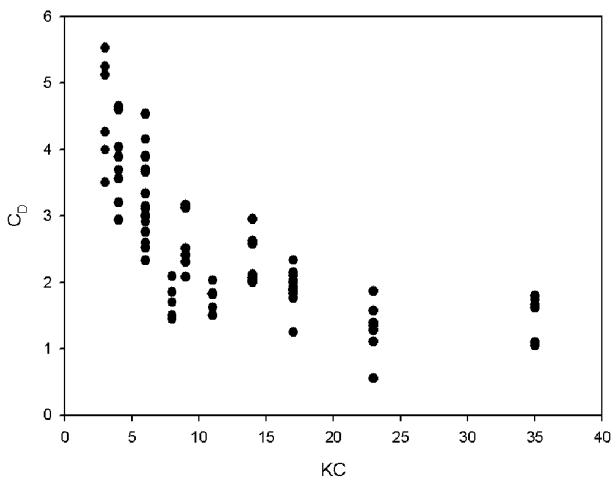


Fig. 6. Comparison of drag coefficient C_D with KC

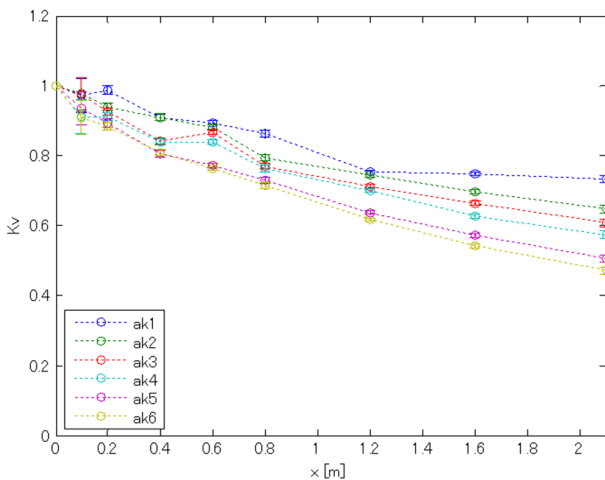


Fig. 7. Wave height ratio K_v with vegetation model

Fig. 7은 Table 1에 나타난 6개의 실험안 $ak1 \sim ak6$ 에 대한 결과를 도시한 것이며 그림에서 횡축은 식생대에서부터의 거리 x 이고 종축은 x 위치에서 식생대에 의한 파고 전달율 $K_v(x)$ 를 나타낸다. 그림에서 보듯이 파고전달율은 x 위치에 증가함에 따라 점차 감소하는 특성을 보이고 있다. 특히 파형경사 ak 가 증가함에 따라 전달율의 감소가 현저하게 나타나고 있으며, $x = 2.1m$ 위치에서 $ak1$ 의 $K_v = 0.735$ 에서 $ak6$ 인 경우 $K_v = 0.475$ 로 나타나 파형경사의 증가 즉 파의 비선형성에 따른 파랑 감쇠가 뚜렷이 나타나는 특성을 보이고 있다.

3. 수치해석

연안 습지식생의 군락을 전파하는 파랑의 감쇠특성을 수치해석하기 위해서는 수심이나 식생 조건을 포함한 2차원적인 수심변화를 취급하는 것이 용이하며 파랑의 전파과정은 선형파 이론을 적용하였고 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 운동방정식이다(Asano, 2006).

연속방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial (nM)}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial (nN)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서 η 는 자유수면변위, M , N 은 각각 (x , y)방향의 선유량을 나타내며, $n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$ 이다.

그리고, 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 u , v 및 w 는 각각 x , y , z 방향의 유속성분, A_h 는 수평확산계수, A_v 는 연직방향 와동점성계수를 나타낸다. 연직방향 와동점성항은 식생 영역의 저면전단응력과 식생이 없는 영역의 저면전단응력으로 나누어, 수심방향으로 적분하면 (5)식과 함께 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} &= -\frac{\tau_x}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} &= -\frac{\tau_y}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 c 는 파속이며, (7)식의 우변 제1항의 τ_x , τ_y 는 다음 (8)식의 저면마찰력(좌변 제1항)과 식생군락에 의한 유체저항항(좌변제2항)의 합이라고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \tau_x &= \frac{f_o}{2} |Q| M/h^2 + \frac{f_v}{2} |Q| M/h^2 \\ \tau_y &= \frac{f_o}{2} |Q| N/h^2 + \frac{f_v}{2} |Q| N/h^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ 이며, 그리고 식생에 의한 저항계수 f_v 는 차원적으로 같다고 하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{f_v}{2}u|u| = \frac{C_D}{2} \int_{-h}^0 NDdz u|u| \tag{9}$$

여기서 C_D 는 식생의 항력계수, N 은 식생밀도(단위면적당 식생 갯수), A_v 는 하나의 식생당 흐름에 대한 투영면적, D 는 식생의 직경이다. 그리고 수치계산시 식생이 존재하는 연안습지 영역내과 식생이 없는 영역 사이의 운동량 교환은 유속경사에 비례하는 확산항으로 나타내었다.

수치계산은 연속방정식, 식(5)과 운동방정식인 식(7)을 유한차분식으로 나타내어 해석하였으며 공간차분에는 수위 η 와 선유량 M, N 을 엇갈림격자로 그리고 시간차분에는 Leap-Frog법을 사용하였다(Lee, 2008).

계산 대상영역은 수리실험에 사용된 영역을 대상으로 하였으며, 수치계산에서는 저면마찰계수 $f_o=0.01$, 수평확산계수 $A_h=0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 하였고, 입사파 및 식생조건은 수리실험에서 적용한 조건을 사용하였다. 그리고 항력계수 C_D 는 수리실험과 수치해석에 의한 파고 감쇠 결과를 비교하여 최적화하였으며 이를 통해 수리실험의 결과보다는 상대적으로 작은 값인 $C_D=0.4$ 를 사용하여 해석하였다.

4. 결과 및 비교 분석

식생에 의한 파고전달 특성에 대한 수리실험과 수치실험

의 결과는 파형경사 ak 와 상대수심 kh 에 대해 Fig. 8 및 Fig. 9 (a)~(f)에 각각 나타내어 비교하였다. 그림에서 횡축은 식생대 시점부터의 거리 x 이고 종축은 x 위치에서 식생대에 의한 파고전달율 $K_v(x)$ 를 나타낸다. 그리고 Fig. 8(a)~(f)는 Table 1의 실험조건 $ak1 \sim ak6$ 그리고 Fig. 9(a)~(f)는 실험조건 $kh1 \sim kh6$ 의 결과를 각각 나타내었다.

Fig. 8(a)~(f)에서 보듯이 파형경사 ak 및 식생대 x 위치가 증가함에 따라 파고전달율 $K_v(x)$ 가 점차 감소하는 특성을 보이고 있다. 이같은 특성은 수리 실험 및 수치해석의 결과와 동일한 경향을 보이고 있으며, 특히 파형경사가 상대적으로 작아서 선형파에 가까운 $ak1$ 및 $ak2$ 에 대한 Fig. 8 (a), (b)에서는 실험치와 수치해석의 결과가 거의 일치하고 있으나 Fig. 3의 Le Mehaute(1969)의 파랑분류도에 따른 비선형파에 해당하는 Stokes 3차파인 Fig. 8 (e) 및 (f)에서는 식생대를 지나가면서 파고전달율이 실험값과 점차적으로 차이가 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 파형경사 $ak < 0.1$ 이하에서는 수치해석의 결과와 수리실험의 결과가 대체로 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다. 이같은 경향을 보이는 것은 본 연구에서 적용한 식생대내 파고감쇠를 해석하는 지배방정식이 선형파 이론을 근거한 때문이며, 파형경사가 상대적으로 큰 경우에는 결과에서 다소 차이가 있는 것으로 보인다.

Fig. 9(a)~(f)에는 상대수심 kh 에 대한 파고전달율 $K_v(x)$ 의 결과를 나타내었으며 Fig. 8의 결과와 유사하게 kh 가 증가함에 따라 파고전달율이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 실험에서는 Fig. 3의 파랑분류도에서 보듯이 상대

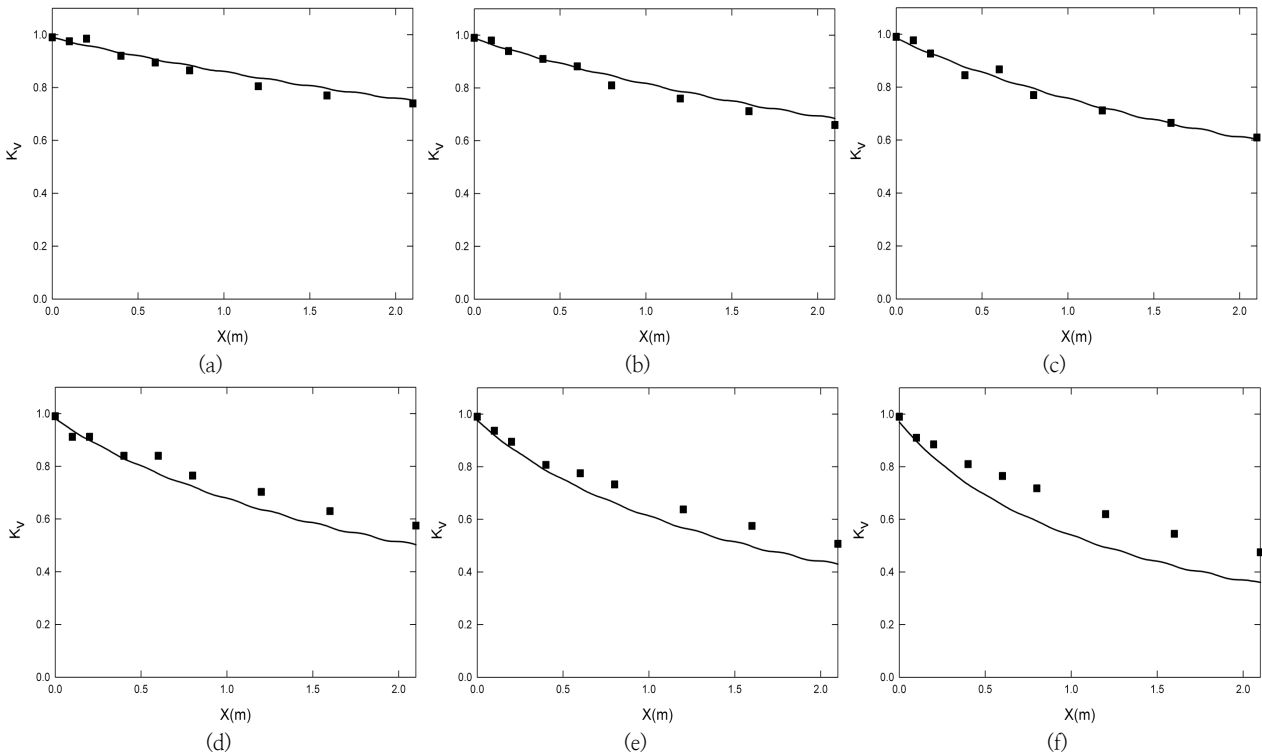


Fig. 8. Wave height ratio along the vegetation model with wave steepness ak
 (■ : Gauge data, — : Numerical result) (a) $ak1$ (b) $ak2$ (c) $ak3$ (d) $ak4$ (e) $ak5$ (f) $ak6$

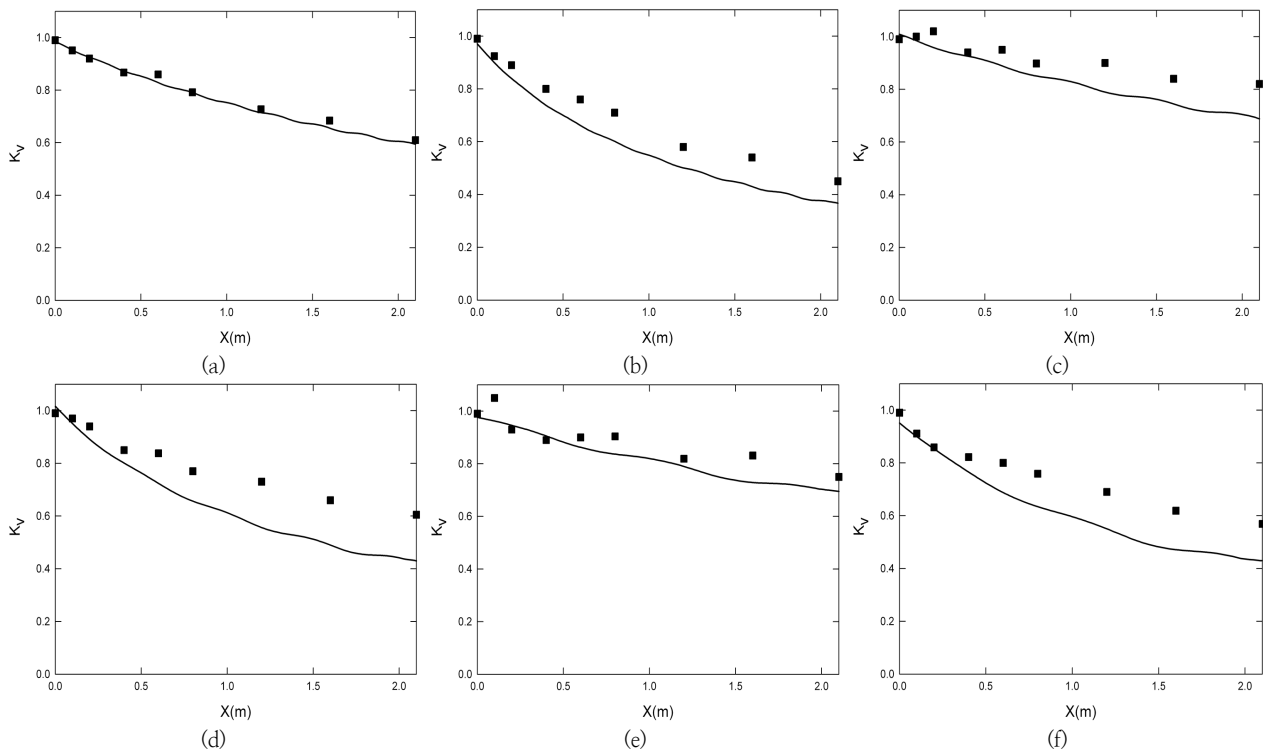


Fig. 9. Wave height ratio along the vegetation model with relative water depth kh
 (■ : Gauge data, — : Numerical result) (a) $kh1$ (b) $kh2$ (c) $kh3$ (d) $kh4$ (e) $kh5$ (f) $kh6$

수심 kh 와 파형경사 ak 의 변화에 따른 검토를 수행하였으며, 파형경사의 변화의 경우에는 Fig. 8의 결과와 유사하게 파형경사가 미소하여 선형파에 가까운 $kh1$, $kh3$ 및 $kh5$ 에 대한 Fig. 9 (a), (c) 및 (e)에서는 실험치와 수치해석의 결과가 대체로 일치하고 있으나 파형경사가 상대적으로 큰 경우에는 다소 차이를 보이고 있다. 그리고 상대수심 kh 의 변화 즉 kh 가 상대적으로 커서 심해파에 가까운 경우는 수치해석의 결과와 수리실험의 결과가 대체로 잘 일치하고 있으나 천해파 영역으로 갈수록 약간의 차이가 나타나는 것으로 파악되었으나, 전체적으로는 파형경사 ak 의 변화에 따라 수리 및 수치실험의 결과가 상대적으로 크게 차이를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 중간수심파에 해당하는 3종류의 상대수심 kh 에 대해서만 수리실험을 수행하였기 때문에 심해나 천해 영역에 해당하는 곳에서는 파랑감쇠의 경향성을 정확히 파악할 수 없었다. 따라서 심해역 및 천해역 등에 해당하는 영역에 해당하는 다양한 파랑조건에 대한 실험연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 일정한 수심의 해역에 수면위로 돌출한 강성의 식생이 있는 경우 파에너지 감쇠 및 파고 변화특성을 수리실험과 수치해석을 통해 비교 검토하였다. 이를 위해 입사파의 파형경사 ak 와 상대수심 kh 의 변화에 따른 식생에 의한 파에너지 감쇠를 평가하기 위해 Reynolds 수 R_e

및 Keulegan-Carpenter 수 KC 에 대한 항력계수 C_D 와 파고감쇠율 α 및 파고전달율 K_v 에 대해 검토하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 파형경사 ak 에 대한 파고감쇠율 α 의 변화에 대해 파형경사 ak 가 증가할수록 즉 비선형파에 대해 파고감쇠율 α 가 증가하였으며 식생대 내 측정위치와는 크게 무관하게 이같은 변동특성이 나타나는 것으로 파악되었다.

2) Reynolds 수 R_e 와 Keulegan-Carpenter 수 KC 에 대한 C_D 의 변화에 대해 R_e 및 KC 가 증가할수록 식생에 작용하는 C_D 는 전체적으로 감소하며 일정한 R_e 에 대해 C_D 의 변동성이 KC 에 비해 크게 나타나 $R_e - C_D$ 의 상관관계가 $KC - C_D$ 의 경우에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 따라서 연안 식생에 작용하는 항력계수는 R_e 보다는 상대적으로 KC 의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 다만 본 실험에서는 조파수조의 한계에 따라 $KC < 40$ 및 $R_e < 2,000$ 에 대해 검토하였기 때문에 실제적인 적용성을 위해서는 $KC > 40$ 및 $R_e > 2,000$ 에 대한 실험적 연구를 통해 명확히 할 필요가 있다.

3) 파형경사 ak 및 상대수심 kh 에 따른 식생대에 의한 파고전달율 특성에 대해 파형경사가 증가함에 따라 전달율의 감소가 현저하며, 상대수심의 변화에 따른 파고전달율의 변화는 크게 나타나지 않았다. 따라서 파고 감쇠는 상대수심의 변화라는 파랑의 비선형성이 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4) 파형경사 $ak < 0.1$ 이하의 선형파 부근에서는 본 연

구에서 제안한 수치해석의 결과와 수리실험의 결과가 대체로 잘 일치하고 있으나 비선형파로 갈수록 다소 차이를 보이고 있으며 이는 이유는 본 수치모형의 지배방정식이 선형파 이론을 가정하였기 때문으로 판단된다.

5) 본 연구에서는 일정수심의 강성식생을 대상으로 검토하였으며, 실제 연안식생에 의한 파랑의 감쇠특성 및 이에 따른 해저지형변동 특성을 파악하기 위해서는 연성식생이나 식생밀도의 변화 그리고 수중식생이 있는 경우 등에 대한 다양한 연구가 요구되며 이에 관해서는 계속적인 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한라대학교 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

- Anderson, ME and Smith, JM (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation, *Coastal Engineering*, 83, pp. 82–92.
- Asano, T, Matsumoto, R, Kikuchi, S (2005). Wave deformation in vegetation fringed channels, Proc. 29th *International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pp. 218–229.
- Asano, T(2006). Wave attenuation and sediment deposition due to coastal vegetation, *J. of Global Environment Engineering*, 11, pp. 29–44.
- Asano, T, Deguchi, H, Kobayashi, N (1992). Interaction between water waves and vegetation. Proc. 23rd *International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2710–2723.
- Augustin, LN, Irish, JL and Lynett, P (2009). Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation, *Coastal Engineering*, 56, pp. 332–340.
- Bergen, A, Alderson, C, Bergfors, R, Aquila, C and Matsil, MA (2000). Restoration of a *Spartina alterniflora* salt marsh following a fuel oil spill, New York City, NY, *Wetlands Ecology and Management*, 8, pp. 185–195.
- Blackmar, PJ, Cox, DT, Wu, W-C (2014). Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 140(1), pp. 56–65.
- Dalrymple, RA, Kirby, JT and Hwang, PA (1984). Wave refraction due to areas of energy dissipation, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 110(1), pp. 67–79.
- Dubi, A and Torum, A (1995). Wave damping by kelp vegetation. Proc. 24th *International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pp. 142–156.
- Hu, Z, Suzuki, T, Zitman, T, Uittewaal, W and Stive, M (2014) Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current – wave flow, *Coastal Engineering*, 88, pp. 131–142.
- Kobayashi, N, Raichle, AW and Asano, T (1993) Wave attenuation by vegetation, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 119(1), pp. 30–48.
- Le Mehaute, B (1969) An introduction to hydrodynamics and water waves, *Water Wave Theories*, Vol II, TR ERL 118–POL–3–2, US Department of Commerce, Washington DC.
- Lee, SD (2008) Wave attenuation due to water–front vegetation, *J. Navigation and Port Research*, 32(5), pp. 341–347. [Korean Literature]
- Ma, G, Kirby, JT, Su, S-F, Figlus, J and Shi, F. (2013) Numerical study of turbulence and wave damping induced by vegetation canopies. *Coastal Engineering*, 80, pp. 68–78.
- Mendez, FJ, Losada, IJ and Losada, MA (1999) Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *J. Geophys. Res.* 104(C8), pp. 18383–18396.
- Mitch, WJ and Gosselink, JG (2000) *Wetlands*, 3rd Ed., Wiley, New York.
- Nepf, H (1999) Drag, Turbulence and Diffusion in Flow through Emergent Vegetation, *Water Resources Research*, 35(2), pp. 479–489.
- Ondiviela, B, Losada, IJ, Lara, JL, Maza, M, Galván, C, Bouma, TJ and van Belzen, J (2014) The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate, *Coastal Engineering*, 87, pp.158–168.
- Ozeren, Y, Wren, DG and Wu, W (2014) Experimental investigation of wave attenuation through model and live vegetation, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 140(5).
- Riffe, K, Henderson, SM and Mullamey, JC (2011) Wave dissipation by flexible vegetation, *Geophysical Research Letters*, 38, L18607.
- Sarpkaya, T and Isaacson, M (1981) Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Selvam, V (2005) Impact assessment for mangrove shelterbelt plantations by tsunami for Tamil Nadu forestry project, *Japan Bank for International Project*.
- Suzuki, T, Zijlema, M, Burger, B, Meijer, MC and Narayan, S (2011) Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN, *Coastal Engineering*, 59, pp. 64–71.
- Teramoto, Y, Asano, T, Hayashi, K, Tada, T, Imai, K and Sakamoto, T (2012) Coastal forest damage from the 2011 Tohoku tsunami and related mitigation by fill at Yuriage beach, Miyagi prefecture, Natori city, Japan, *J. Japanese Society of Coastal Forest*, 11, pp. 11–18.

- U.S. Environmental Protection Agency, America's Wetlands, 16 July 2007, <http://www.epa.gov/OWOW/wetlands/vital/toc.html>.
- Zeller, RB, Weizman, JS, Abbett, ME, Zarama, FJ, Fringer, OB and Koseff, JR (2014) Improved parameterization of seagrass blade dynamics and wave attenuation based on numerical and laboratory experiments, *Limnology and Oceanography*, 59(1), pp. 251–266.
- Zou, ZL, Hu, PC, Fang, KZ and Liu, ZB (2013) Boussinesq-type equations for wave-current interaction, *Wave Motion*, 50, pp. 655–675.