

파랑과 바람 공존장에서의 호안 전면 수리특성 검토 A Study of Hydraulic Characteristics in Front of the Seawall under the Coexistence of Wave and Wind

심규태* · 김규한**
Kyu-Tae Shim* and Kyu-Han Kim**

요지 : 본 연구에서는 단면2차원수리모형실험을 통하여 파랑과 바람이 공존할 경우 호안주변에서 발생하는 수리현상을 검토하였다. 최근의 호안 보수·보강사례를 토대로 서로 다른 4가지의 대표적 호안형상에 대하여 호안전면에 소파블록을 거치한 조건으로 실험단면을 구성하였고 외력변화에 따른 수면변동, 반사율, 월파 및 파압특성을 검토하였다. 호안의 상치형상은 호안전면에 나타나는 수리특성의 가장 중요한 요소이며 바람이 작용할 경우에는 그 경향이 더욱 뚜렷이 나타나는 것을 확인하였다. 실험결과 직립호안의 경우만 보더라도 3 m/s~5 m/s의 바람이 발생할 경우 월파량은 약 5%~12% 증가되었으며 파압의 경우 상치 마루부에서 1.5~2.2배까지 증가되는 것을 확인 할 수 있었으며 상치형상이 다른 3가지의 경우에 바람의 작용이 추가될 경우 호안전면의 수리특성은 변화폭이 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 새로운 상치형상의 호안 설계 시에는 이러한 실험결과를 토대로 파랑과 바람 공존장에 대한 보다 상세한 수리특성 검토가 수반되어야 할 것이다.

핵심용어 : 풍속, 파압, 월파, 호안형상, 수리모형실험

Abstract : In this study, a two-dimensional hydraulic model test was conducted to examine the hydraulic phenomena that occur around the seawall when wave and wind coexist. Based on recent seawall repair and reinforcement examples, the experimental section was constructed under the condition of installing wave dissipation blocks on the safety surface of four different representative seawalls. Water level fluctuation, reflection, overtopping and wave pressure characteristics according to external force change were reviewed. It was confirmed that the top concrete shape of the seawall is the most important factor of the hydraulic characteristics that appear in front of the seawall, and the tendency is more pronounced when wind acts. Even in the case of vertical type seawall, when wind of 3 m/s~5 m/s occurs, the amount of overtopping increases to about 5%~12%. In the case of wave pressure, it was confirmed from the experimental results that the value increased from about 1.5 to 2.2 times in front of the top of concrete block. In addition, it was confirmed that when the shape of the seawall was different, the range of change in the hydraulic characteristics appeared larger. Therefore, when designing a seawall of a new shape, a more detailed review of the hydraulic characteristics should be accompanied based on these experimental results.

Keywords : wind speed, wave pressure, wave overtopping, seawall shapes, physical model test

1. 서 론

최근 발생빈도와 규모가 증가하고 있는 고파랑은 일반적으로 강풍을 동반하기 때문에 사석경사식의 구조물에서는 제체의 경사면을 따라 높은 처오름과 대규모 월파가 발생된다(Carrasco et al., 2018; Lorenzoni et al., 2016). 이 과정에서 파랑에 직접적으로 노출되는 상치콘크리트와 소파블록은 고파랑의 규모에 비례하여 침하·파손 및 이탈 등의 피해가 발생된다. 특히 소파블록의 마루높이가 침하되는 현상은 상치

콘크리트의 노출범위 확대에 따른 구조물의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 월파량 증가에 기인된 항내소란을 유발하여 정상적인 항의 운영을 제한한다. 이에 대한 방안으로써 낮아진 마루높이를 다시 복원하거나 기존 블록위에 중량이 증가된 소파블록의 설치 또는 방파제의 마루높이를 증고 하지만 공사 완공 후에도 지속적인 월파로 인근 주거지역에 침수 및 시설물 파손 등의 피해사례가 나타나고 있다.

과거부터 효과적인 월파의 제어를 위해 다양한 월파 방지 대책이 검토되어져 왔으며(Franco et al., 1994; Bruce et al.,

*가톨릭관동대학교 토목공학과 강사(Lecturer, Civil Engineering, Catholic Kwandong University)

**가톨릭관동대학교 토목공학과 교수(Corresponding author: Kyu-Han Kim, Professor, Civil Engineering, Catholic Kwandong University, 24 Beomil-ro 579 beon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25601, Korea, Tel: +82-33-643-3436, Fax: +82-33-647-3436, khkim@cku.ac.kr)

2018; Kerpen et al., 2019; Kim et al., 2019), 최근에는 방재 측면 뿐만 아니라 해역의 환경·이용면을 고려한 새로운 형식의 호안의 개발 및 설계가 계획되고 있다(Li et al., 2015; Kerpen et al., 2019). 대표적으로 월파를 제어하기 위해 직립식 방파제에 월파저감시설을 설치한 후 그 효과를 유도함과 동시에 호안전면에 소파블록을 병용하여 월파제어를 검토한 사례가 있으며(Murakami et al., 1996), 방파제뿐만 아니라 호안 상단에 호안과 일체형으로 설치된 곡선 형상을 갖는 반파형 구조형식에 대한 월파저감 효과를 검토한 연구가 있다(Altomare et al., 2016; Pearson et al., 2004; Pullen et al., 2009). 이외에 Doorslaer et al.(2015)은 호안 배후 지역을 매립하여 도로, 공공시설 및 주거지역 등을 계획하는 경우 월파저감 기능을 높이기 위해 기존 호안에 상치형상과 마루높이를 변화시킴으로써 파력 및 월파제어를 위한 연구결과를 제시하고 있다. 하지만 호안과 같은 구조물에 대해서는 여러 가지 측면에서 면밀한 연구가 요구된다. 예를 들면 쇄파 범위 내에 구조물이 설치되어 있는 경우 파력 특성과 월파 저감효과에 대해서는 해명되지 않은 점이 많으며, 월파 대책 공법을 갖는 직립형 호안의 경우 월파와 작용 파압양상에 관한 연구는 충분한 검토가 이루어져야 한다. 아울러, 직립소파 호안에 대한 월파량과 비말(splashing)현상은 바람의 영향에 밀접한 관계를 갖는다는 것은 이전부터 알려져 있는 현상이다. 하지만, 일부 연구자들에 의해 실제 단면을 모형화한 실험적 검토 및 현지 관측에 근거한 국한된 검토가 수행되어 왔다(Fukuda et al., 1974). 하지만, 호안 설계시 바람의 영향을 고려하여 월파량과 비말량을 평가하기까지는 이르지 못하고 있

다(Murakami et al., 2019).

본 연구에서는 최근들어 호안에 보수·보강사례가 증가하고 있는 점과 이상파랑 내습시 강풍이 발생하는 사항 등을 고려하여 소파블록이 보강된 사석경사식 호안을 대상으로 다양한 요인을 검토하였다. 실제의 현상을 추론하기 위해 2차원 단면수리모형실험을 통해 파랑과 바람이 공존하는 조건에서 호안에 작용하는 물리현상을 검토하였다. 실험에서는 바람의 규모, 상치콘크리트의 형상을 변수로 할 경우, 월파량과 각 부재(상치콘크리트 및 소파블록 배후)에 작용하는 파압분포, 호안전면에서의 수면변동과 반사계수의 변화 등을 검토하여 다양한 조건에서 야기되는 수리현상에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 바람분포 분석

고파랑 발생시 바람이 동반되는 상황과 발생규모를 파악하기 위해 현지관측데이터를 분석하였다. 데이터는 국립해양조사원에서 제공하고 있는 해양관측부이 데이터 중 유의파고와 평균풍속결과를 이용하였다. Fig. 1에 정리된 결과는 한국 동해안에 위치한 낙산부이(38° 07' 20.8" N, 128° 39' 01.9" E) 및 경포부이(37° 48' 32.3" N, 128° 55' 54.8" E)이며, 각각 2년~4년간 관측된 파랑·바람의 시계열 분포이다. 설치위치는 수심 25 m 부근으로, 해안으로부터 각각 1.45 km, 1.82 km 이격되어 있으며 두 부이간 거리는 약 50 km에 해당된다. Fig. 1에서 보이듯이 평균적으로 3 m 이상의 파고 출현시 10 m/s 이상의 풍속이 발생되었다. 한편, 한국에서는 이상 기압골의 형성에 의한 돌연적 파랑의 출현이 관찰되고 있다

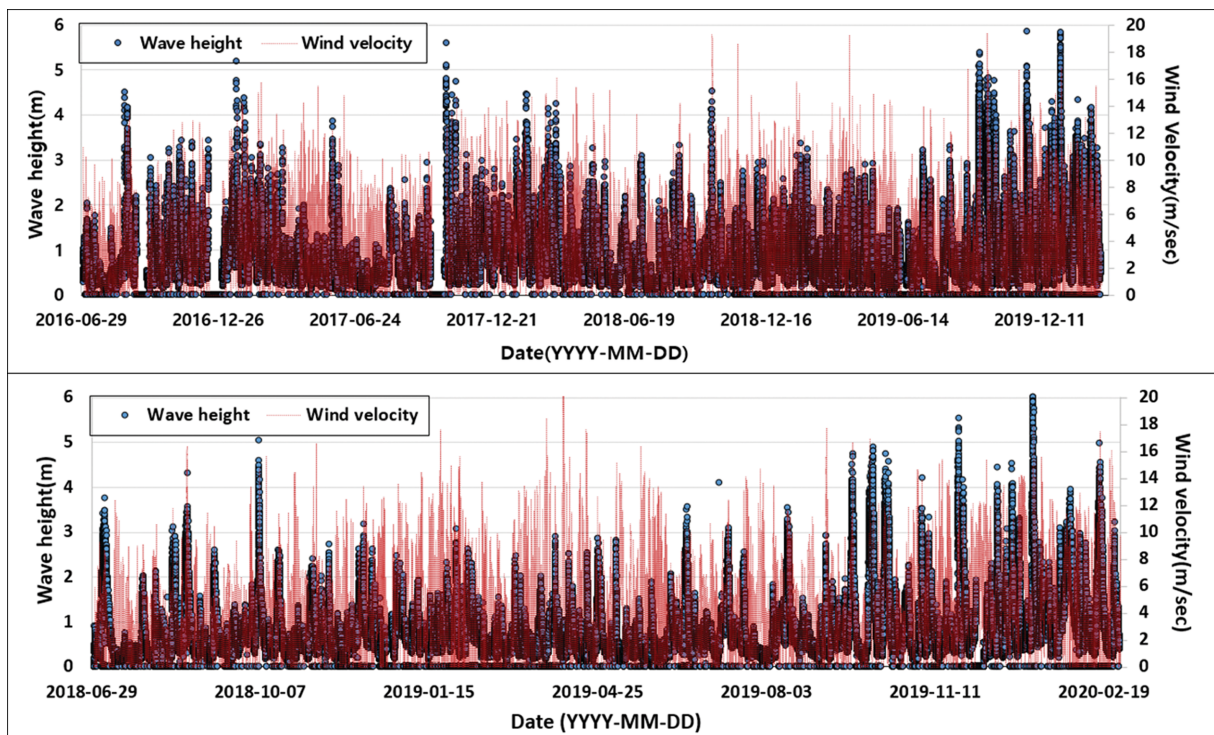


Fig. 1. Wave-Wind data on the Gyungpo buoy (Top) and Naksan buoy (Bottom).

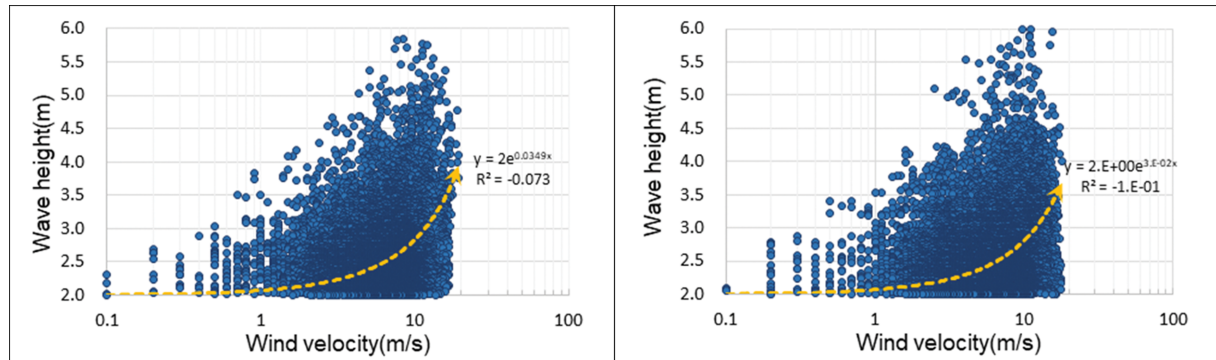


Fig. 2. Distribution of wave-wind occurrence on the Naksan buoy (L) & Gyungpo buoy (R).

(Jung et al., 2007). 이때 형성된 이상기압골은 강한 바람장의 형성 없이 장주기를 동반한 고파랑을 발생시키며 해안으로 전파되는데 본 논문에서는 이상기압골의 영향으로 갑작스럽게 발생하는 이벤트성 파랑은 고려하지 않았다.

Fig. 2에 도시된 바와 같이 파고 2 m 이상의 조건에 해당하는 바람의 관측자료를 살펴보면 주로 2~3 m의 파고범위에 풍속은 넓은 분포를 보이고 있다. 파랑발생의 관점에서 살펴보면 2 m의 파고 출현시 바람은 1~14 m/s의 분산된 범위를 보이나, 3.5 m 이상의 조건에서는 풍속 5 m/s 이상의 범위에 집중되어 있다. 특히, 4.0 m 이상의 파랑의 출현은 10 m/s 급의 조건에서 주로 발생되고 있으며 이러한 현상은 관측부이 두 지점에서 동일하게 나타나고 있다. 추세선에서도 보이듯이 고파랑 발생에 따른 바람의 규모는 급격히 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 관측된 두 지점에서 파고와 바람간의 관계가 보퍼트 풍력등급(Wheeler and Wilkinson, 2013)에서 제시하고 있는 결과와 상당부분 일치하는 것으로 나타났다.

3. 실험조건의 설정

3.1 실험시설 및 실험단면

풍속의 변화가 수리특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 실험은 흡수조파 기능이 포함된 2차원단면수로(L: 40 m, W: 1.0 m, H: 1.5 m)에서 진행되었으며, 조파구동부 상단에는 풍동장치가 설치되어 있어 풍파의 재현 및 파랑(Max. Hs: 0.5 m, Ts: 5 sec)과 바람(Max. U: 20 m/s)을 고려한 수리현상의 검토가 가능하다. 구조물이 설치되는 지점 전면 하상은 콘크리트로 구성된 1:30의 경사로

이루어져 있다(Fig. 3). 실험단면은 과거에 비하여 파랑내습 규모와 월파랑의 증가 및 배후지역의 활용도를 높이기 위한 방안, 현지자료(Fig. 1, 2)와 보수·보강 사례를 토대로 Fig. 4와 같은 단면형상을 구성하였다. 이때 소파블록은 한국에서 현지적용사례가 많은 Tetrapod를 이용하였으며(1~2단 179.7 g, 3~4단 449.2 g), 전면수심은 20.3 cm로 동일하게 설정하였다.

3.2 실험방법 및 실험조건

수리모형실험에 적용된 변수값 중 파고 및 주기는 규칙파와 불규칙파로 구분하여 각각의 조건에 대한 특성을 검토하였다(Table 1). 규칙파의 경우(Case-A~D) 비쇄파 조건으로 에너지 밀도와 파형경사의 변화에 따라 호안전면에서 발생하는 수면변동 및 반사계수의 분포를 검토하였다. 불규칙파 조건에서는(Case-E) 단일 파고와 주기에 대해 바람의 강도변화에 따른 파압, 월파, 구조물 전면 수면변동의 특성을 검토하였다. 본 연구에서는 파랑이 구조물에 작용할 때 풍속변화가 수리특성에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이므로 상치콘크리트의 형상 및 풍속의 변화를 제외한 제반사항은 동일하게 설정하였다. 월파랑 분석은 상치콘크리트 배후에 월파용기를 설치하여 수집된 총 유량을 단위시간 및 단위폭으로 환산한 평균월파랑 $q(\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm})$ 에 대해 정리하였다(TAW, 2002; EurOtop, 2018). 파압은 계측시 파압센서(PS-05KC, KYOWA)를 상치콘크리트 전면 상단부, 소파블록 배후 및 상치저면에 위치한 콘크리트블록 전면에 부착하였으며 대기중에 노출되는 지점과 피복블록으로 차폐된 지점 및 수면아래에 위치한 지점 등 다양한 위치에서 발생하는 파압분포를 검토하고자 하였으며 계측위치는 실험결과와 함께 제시하였다(Fig. 9). 파압신호는 조파시간 동안 1 kHz 간격으로 취득 후 데이터를

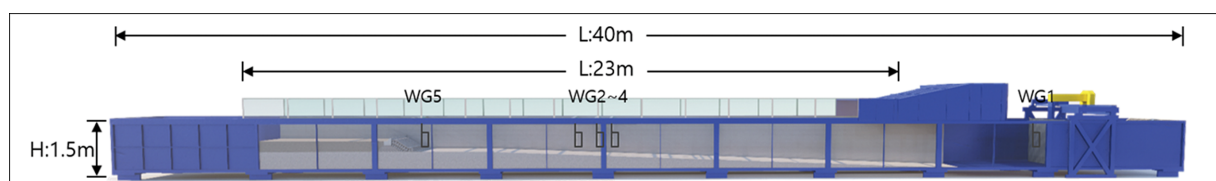


Fig. 3. Wind-wave flume & cross-section.

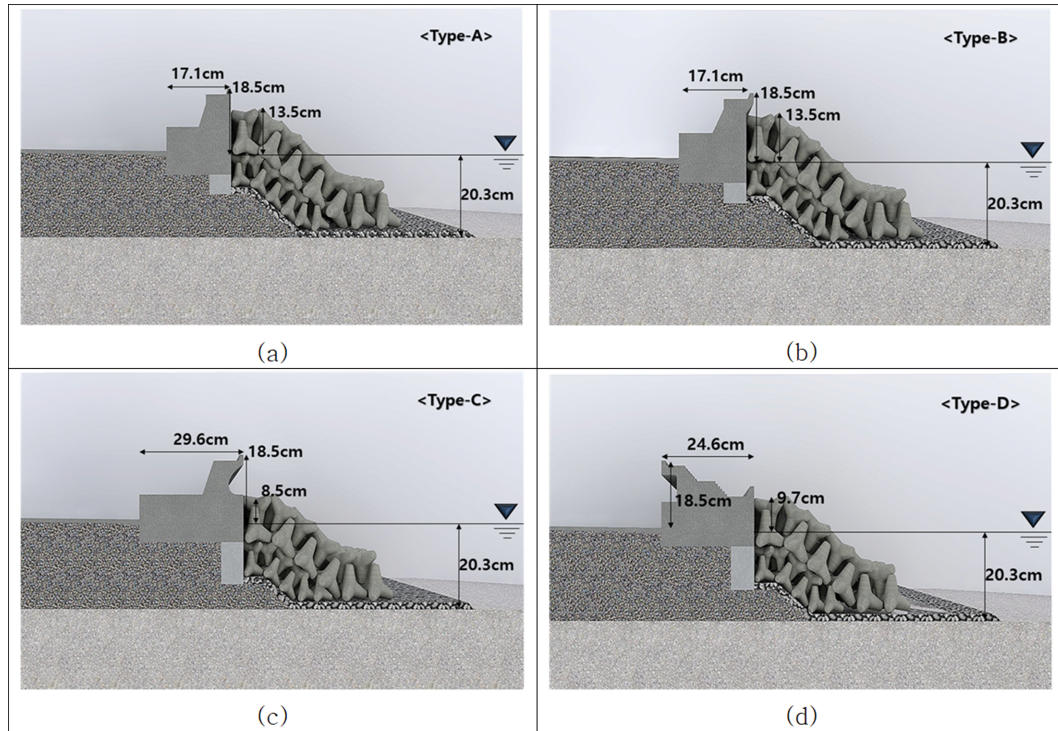


Fig. 4. Cross-sectional profiles: Vertical type (a); Nabla type (b); Flare type (c); Front inclined type (d).

Table 1. External force conditions

Scenario	Hs (cm)	Ts (sec)	H/L ₀	U (m/s)	Rc (cm)	Shape of seawall	Measurement category
Case-A	2.5, 5.0, 7.5	1.42	0.008 ~0.024	0 3	19.60	Type-A Type-B Type-C Type-D	1. Wave Reflection Coefficient 2. Water Surface Fluctuation
Case-B	5.0, 7.5, 10.0	1.58	0.013 ~0.026	0 3			
Case-C	7.5, 10.0, 12.5	1.90	0.013 ~0.022	0 3			
Case-D	10.0, 12.5, 15.0	2.21	0.013 ~0.020	0 3			
Case-E	15.5	2.51	0.016	0			1. Wave Pressure 2. Wave Overtopping 3. Water Surface Fluctuation
				3			
				5			

2개 평균하여 최대파압을 도출하였다. 조파시간은 정상파가 생성된 다음부터 500파랑이며, 불규칙파 기준(Case 5)으로 21분에 해당된다. 실험은 각 조건당 2~3회 반복하였으며, 반복되는 실험 간의 발생 가능한 파고오차를 최소화하기 위해 조파관에 용량식파고계를 부착하여 실시간으로 발생파고를 확인하였다. 아울러, 파고계(CHT6-60, KENEK)를 구조물 전면 1.5 L 이격된 위치에 3기, 구조물 전면 toe부 상단에 1기를 설치하여 반사계수(Mansard and Funke, 1980; Wang et al., 2008) 및 수면변동을 검토하였으며, 실험에 대한 전반적인 상사율은 1/40의 Froude similarity law를 적용하였다. 한편, 바람에 대한 상사는 아직 정확한 기준이 수립되어 있지 않지만 Yamashiro et al.(2005)의 연구결과에 의하면 실험실에서의 모

형화된 풍속은 현지의 1/3의 강도를 갖는다고 언급하고 있다.

본 실험은 풍속변화에 대한 수리현상분석이 주 목적이므로 U = 0, 3, 5 m/s의 3가지 조건을 설정하였다. 설정풍속은 Yamashiro(2005)의 연구에 의하면 약 0, 9, 15 m/s의 현지풍속이 되며 이때 보퍼트풍력계급에서는 풍속 9 m/s~15 m/s는 파고 2 m~5.5 m의 범위에 포함된다고 언급하고 있다. 부이관 측자료(Fig. 1, 2)에서는 2 m~5.5 m의 파고일 경우 풍속은 평균 5 m/s~10 m/s에 해당되며 본 실험은 관측자료 기준으로 Froude 상사율을 적용하여 실험안(Case A~D)을 설정하였다. 그 중 이상시 조건(Case E)을 추가로 설정하여 실험을 진행하였다(Table 1).

수조내에서 목표풍속 측정에 사용된 풍속계(0956-01,

KANOMAX)는 최대 9840 fpm(50 m/s)의 풍속을 측정할 수 있으며 WG5(Fig. 3)와 같이 구조물 toe부 해측법선 상에 설치하였다. 또한, 진행 파랑이 구조물에 작용할 경우 처오름과 월파 등의 현상에만 영향을 미치기 위해 수면과 평행하게 바람을 발생시켰다. 실험시 풍속에 대한 검증은 조파시간과 동일한 바람을 발생시켜 풍속계와 연결된 Air Flow Transducer로부터 출력되는 수치를 확인하였으며 이때 편차는 ± 0.2 m/s로 적용하였다.

4. 실험결과

4.1 구조물 전면 수면변동

호안형상과 바람장 변화에 따른 수면변동을 검토하기 위해 toe부 상단(WG5)에서 측정한 파고데이터를 분석하였다. 첫 번째로, 구조물이 설치되지 않는 조건에서 파랑에 대한 신호와 파랑과 바람이 공존된 상태에서의 신호를 상호 비교하여 바람작용에 의한 파고변화를 검토하였다. 구조물 미설치시 WG5에서 취득된 파고데이터 분석결과 실험에 적용된 풍속은 파고변화에 큰 영향을 미치지 않을 정도로 미소한 것으로 확인되었다(Fig. 5). 이상의 조건을 이용하여 구조물 설치 후 상

치 전면(WG5)에서의 수면변화를 검토하였다. 파고데이터는 20 Hz 간격으로 취득된 값 중 16,384ea의 data를 이용하였으며 결과는 주파수 스펙트럼에 대한 에너지밀도와 계측 시계열 데이터를 비교하였다. 스펙트럼 분석결과 바람의 유무에 관계없이 다봉형의 형상이 나타났다. 무풍시의 조건에서($U = 0$ m/s) 구조물 전면 파고분포는 상치형상에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 모두 유사한 경향이 나타났다(Fig. 6). 이러한 현상은 마루높이(R_c : 18.5 cm)가 같으며, 소파블록이 4층적으로 거의 동일한 위치에 거치된 단면형상에 의한 것으로 분석된다.

5 m/s의 풍속이 발생하는 조건에서 4개의 상치콘크리트 중 Type-D의 경우 에너지밀도가 다소 높게 나타나는데 type-D는 상치형상이 해측 방향으로 기울어져 있어 상치 마루부까지 도달한 해수가 외해로 되돌아 갈 때 수면에 낙하되는 과정에서 가속되어 수면변동에 더 큰 영향을 작용하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6에서도 나타났듯이, 무풍시 에너지 밀도는 작은 차이를 보이고 있지만, 바람($U = 5$ m/s)이 동반될 경우 에너지밀도의 변동폭은 무풍시에 비하여 증가되었다. 특히, 처오름과 처내림 현상이 강한 Type-D의 조건과 파랑의 반사가 크게 발생하는 Type-C에서 수면변동이 크게 나타났

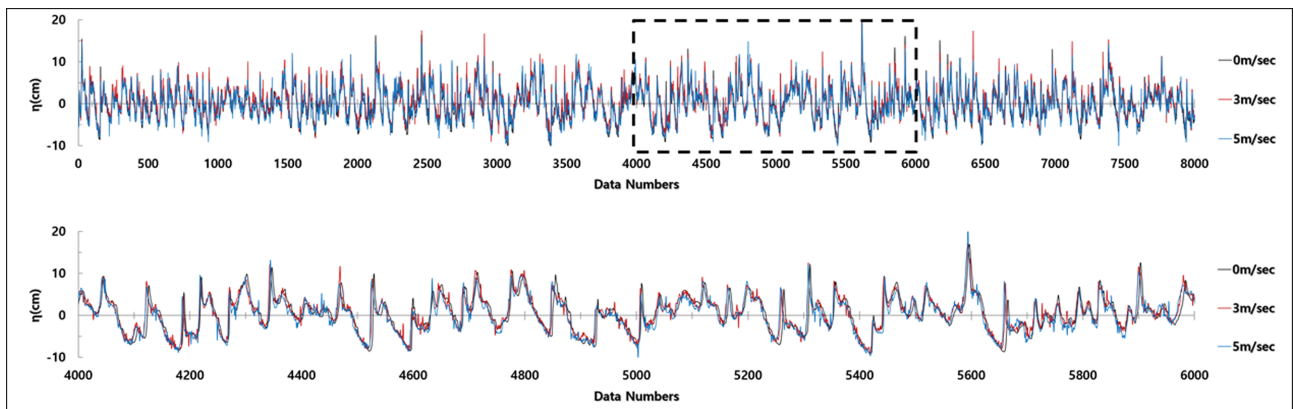


Fig. 5. Time series data of test wave calibration on the toe; total data (top) and Magnified section (bottom).

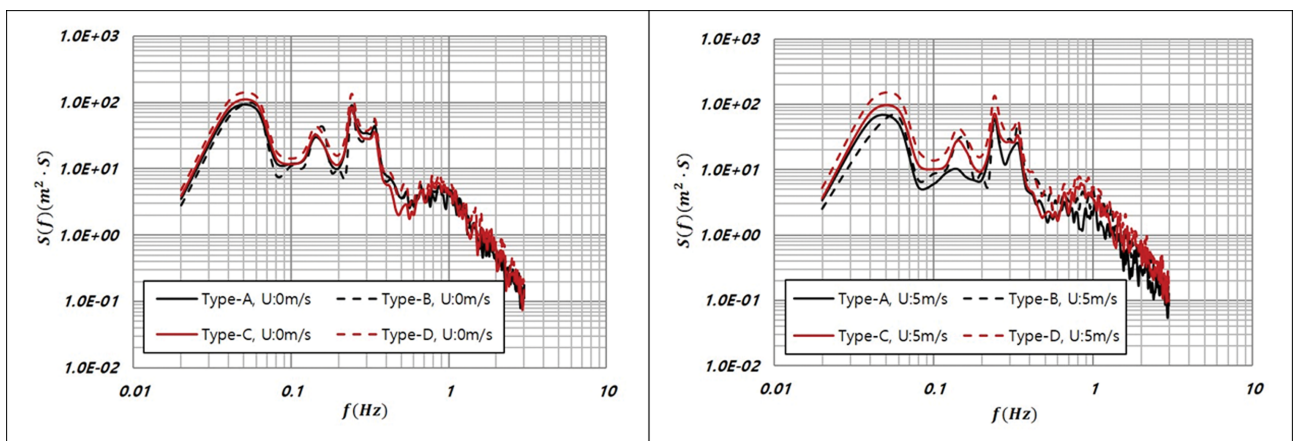


Fig. 6. The change of energy density depending on the shape of seawalls on the toe under Case-E condition: (L) is $U = 0$ m/s; (R) is $U = 5$ m/s.

으며, Type-A와 B는 상대적으로 작은 파고가 형성되었다.

한편, 구조물 미설치시 수행된 파랑검증실험에서 입사파랑은 쇄파로 인하여 장주기 성분이 존재하였으며, 구조물설치 후 계측된 Toe부에서의 파랑에너지는 Fig. 6와 같이 다봉형의 첨두를 갖는 형상을 보이고 있다. 이러한 현상은 쇄파율이 증가될수록 더욱 두드러지게 나타났으며, 쇄파율이 낮으며 바람을 이용하여 진행된 유사실험(Shim et al., 2019)에서는 단일 첨두를 갖는 스펙트럼이 발생되어 다봉형의 스펙트럼은 쇄파발생조건 또는 장주기파랑 내습조건과 연관이 있는 것으로 판단된다(Muraleedharan et al., 2010). 아울러, Fig. 6에서도 나타나듯이 풍속의 증가는 구조물 전면 파고변화 및 에너지밀도 형성에 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 월파랑, 파압 및 반사계수 변화에 주요한 원인으로 작용할 것으로 판단된다.

4.2 반사율 검토

비월파, 비쇄파 조건인 상태에서 풍속 및 상치형상의 변화에 따른 구조물 전면에서의 반사특성을 검토하기 위해 총 96개 조건(Case-A~D)에 대해 실험을 수행하였다(Table 1). 반사계수는 Sine파 100파랑 내습조건에 대해 분석하였다. 실험결과 전반적으로 파형경사가 증가될수록 반사계수 또한 비례하여 증가되는 경향이 나타났다(Fig. 7). 단면형상 변화에 따른 검토결과, 전반적으로 Type-C의 조건에서 반사계수가 높게 나타났으며, Type-A와 B에서 상대적으로 작은 값이 도출되었다. 이러한 현상은 Type-C의 경우 소파블록 마루부가 다른 단면의 소파블록 마루높이에 비해 낮으며 소파블록의 체적감소와 상대적으로 넓어진 상치콘크리트의 노출범위는 반사파를 증가시키는 것으로 나타났다. 아울러, 곡선으로 된 상치형상 또한 반사파를 증가시키는 원인으로 판단된다. 이와 반대로 Type-A와 B는 소파블록의 마루부가 상대적으로 높기 때문에 반사계수가 낮게 발생된 것을 알 수 있다. Fig. 6의 결과에서도 알 수 있듯이 Type-D 단면은 수면변동이 큰 조건이며 특히, 풍속이 증가될 경우 수면변동은 다른 단면형상에 비해 최대가 된다. Type-C의 경우와 같이 비월파, 비쇄파

조건에서는 상치형상과 소파블록의 거치 높이에 의해 반사율이 크게 좌우되며 Type-D와 같은 형상과 투영면적이 큰 경우 바람의 작용과 그 강도가 강해질수록 반사파 역시 증가되는 경향이 나타나고 있다. 3 m/s의 풍속이 동반된 조건에서는 파랑활동에 큰 변화는 발생되지 않았다. 하지만 파랑과 동일한 방향으로 작용하는 바람의 영향에 의한 파랑에너지의 증가는 반사계수를 다소 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 구조물 전면에서의 파고증가현상과 에너지밀도의 변화를 분석해 볼 때 풍속의 증가는 입사파의 강도뿐만 아니라 반사파의 규모도 증가시키는 것을 알 수 있다.

4.3 월파랑 검토

풍속 및 단면형상 변화에 따른 월파현상을 검토하기 위해 실험결과를 평균월파랑($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)으로 환산하여 비교하였다(Fig. 8). Type-A 단면 설치시 월파현상은 풍속의 강도에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. $U = 0 \text{ m/s}$ 의 조건에서 $0.025 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 의 월파랑이 발생되었으며, $U = 5 \text{ m/s}$ 의 풍속이 동반될 경우 파속 및 처오름의 증가에 의해 12%의 월파랑이 증가되었다. Type-B의 경우 상단부가 돌출된 영향으로 상치콘크리트 벽면을 따라 월파되는 현상이 Type-A에 비해 상대적으로 감소되었다. 실험결과 $U = 0 \text{ m/s}$ 의 조건에서 $0.018 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 의 월파랑이 발생되었으며, $U = 5 \text{ m/s}$ 의 풍속이 동반될 경우 Type-A와 같은 현상에 의해 17% 이상의 월파랑이 증가되었다. Type-C의 경우 대부분의 파랑은 상치형상에 의해 해측방향으로 이동되었으나 유의파고 이상의 파랑 내습시 구조물 전면에서의 중복파 발생에 따른 순간 월파랑이 증가되는 현상이 나타났다. 실험에서는 $U = 0 \text{ m/s}$ 의 조건에서 $0.019 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 의 월파랑이 발생되었으며, $U = 5 \text{ m/s}$ 의 풍속조건에서 11%의 월파랑이 증가되었다. Type-D 설치시 소파블록을 따라 처오르는 파랑은 연속적으로 상치콘크리트의 경사면을 따라 배후측으로 이동되었으며 바람작용시 그 현상은 더욱 증가되는 것으로 나타났다. 실험결과 $U = 0 \text{ m/s}$ 의 조건에서 $0.022 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 의 월파랑이 발생되었으며 $U = 5 \text{ m/s}$ 의 풍속 작용조건에서 14%의 월파랑이 증가되었다. 분석결과, 전

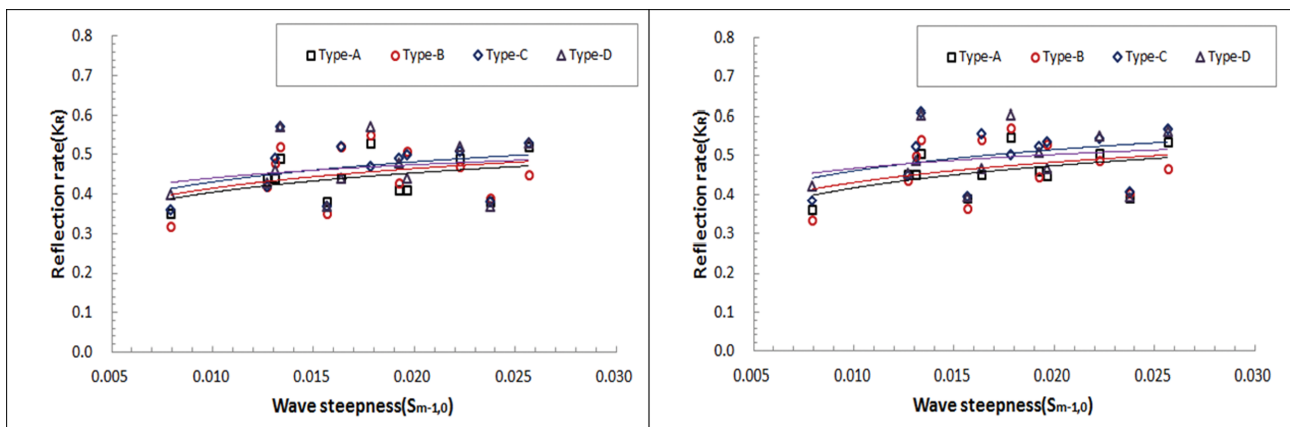


Fig. 7. Analysis result of Reflection coefficient: U: 0 m/s (L); U: 3 m/s (R).

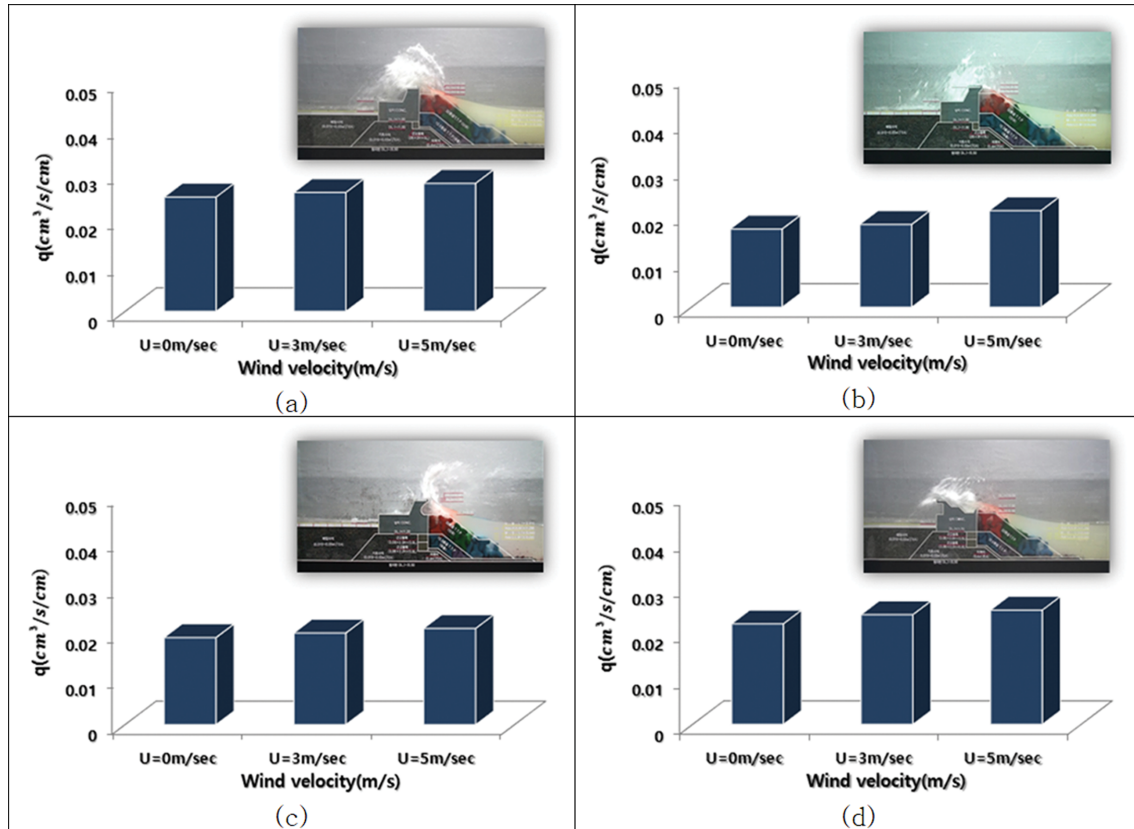


Fig. 8. Results of wave overtopping discharge depending on the wind velocity change: vertical type (a); nabla type (b); flare type (c); front inclined type (d).

반적으로 Type-A의 조건에서 바람장의 형성과 관계없이 월파량이 가장 크게 나타났으며, 풍속변화에 따라서는 Type-B 단면이 무풍시에 비하여 17%의 월파량이 증가되어 가장 큰 변동폭이 발생되었다. Type-C의 경우, 파량이 소파블록의 전면사면을 따라 배후로 월파되는 현상이 상치형상에 의해 제어되었으며 바람이 발생하는 조건에서도 처오름에 의해 상치 배후로 이동되는 해수의 제어는 다른 상치조건에 비하여 유리하게 나타났다. Type-D의 경우 파의 처오름에 직접적인 영향을 받는 형상이며 장주기를 동반한 고파랑 내습조건에서 월파발생이 높은 것으로 나타났다. 이상의 실험결과는 바람을 이용한 현지관측결과 및 모형실험 결과와 유사한 월파 메커니즘이 발생하는 것으로 분석되었다.

4.4 파압 검토

파압은 각 부재에서 발생하는 최대파압에 대해 무차원값으로 나타내었다. 또한, 각각의 단면형상에 바람장이 미치는 영향을 검토하고자 실험값과, 이론식에 의한 결과를 비교 하였다. 이론식은 Hiroi(1920), Sainflou(1928), Minikin(1963), Goda(1974) 등 여러 연구자가 제안한 경험식이 있으나 본 연구에서는 항만구조물 설계 등 파압계산에 검토되는 사례가 많은 Goda 식을 이용하였다. 이때 소파블록으로 피복된 배후면에서의 파압산정은 수정 Goda(2010) 식 중 소파블록으로 충분히 피복되었을때의 파력산정식을 이용하였으며, 상치부

분은 상부사면 케이스제의 파력산정식(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2019)을 이용하였다. Goda 식 중 무차원화된 파압은 다음과 같이 정의된다.

$$P/\rho g H_s \quad (1)$$

여기서, P : $P_o(P_{\max})$ 최대파압, ρ : 유체의 밀도, g : 중력가속도, H_s : 실험파고이다. 아울러, 계산에 적용된 대표적인 파압계산식은 다음과 같이 정의된다.

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1\lambda_1 + \alpha_2\lambda_2\cos^2\beta)\rho g H \quad (2)$$

여기서, P_1 : 최대압력, β : 내습파랑의 각도, ρ : 유체의 밀도, g : 중력가속도, λ_1, λ_2 : 구조물설치 지반의 계수, α_1, α_2 : 파압계수, H : 파고이다.

실험결과 Type-A 단면의 경우 무풍시 정수면 부근에서(P2) 최대 파압이 발생되었으며, 마루부에서는 두번째로 큰 파압이 계측되었다. 하지만 바람이 동반될 경우 상치 마루부인 P4 지점에서 최대 파압이 작용하였으며, 정수면 부근인 P2 지점에서 그 다음으로 큰 파압이 작용하였다. 바람의 강도 변화는 상부파압분포에 큰 영향을 미쳤으며, 특히 파랑에 직접적으로 노출되는 P4 지점에서 최대가 되었다. 이론식과 비교시 계산상에서는 P1에서 가장 큰 파압이 나타났으며, 해수에 직접적으로 노출되는 P4 지점에서 가장 작은 파압이 발생되어

실험결과와 다소 상이한 경향을 나타내었다. Type-B의 경우 Type-A와 유사한 분포를 나타내었다. 무풍시 마루부(P4)와 정수면 근처(P2)에서 강한 파압이 발생되었으며, 저면(P1)에서 가장 작은 파압이 측정되었다. 하지만 바람이 공존할 경우, 상치 마루부(P4)에서 최대 파압이 작용하였으며, 소파블록 배후인 P3에서 압력값이 감소되다가 정수면 부근인 P2 지점에서 다시 증가하는 분포를 보였다. 풍속변화에 따른 파압변화량 또한 P4 지점에서 최대가 되는 것으로 확인되어 바람 동반시 파랑활동이 강해지는 것을 알 수 있다. 이론식과 비교할 경우 지점에 따른 파압분포 경향이 다소 차이가 있었으며, 그 차이는 마루부에서 최대가 되었다. Type-C의 경우 무풍시 상치콘크리트의 곡률부(P4)에서 최대 파압이 발생되었으며, 정수면과 가장 가까운 P2에서 그 다음으로 강한 파압이 발생되었다.

바람이 동반될 경우, 최대파압은 곡률부에서 발생되었으며, 변동폭은 마루부인 P5에서 최대가 되었다. 이론식과의 비교에서 대부분의 지점에서 파압값은 큰 차이를 보였으며 특히, 곡률부에서 그 양상이 최대가 되었다. Type-D의 조건에서 무풍시 소파블록이 거치되지 않는 P4~P6 지점에서 강한 파압이 발생되었으며, 소파블록 배후인 P3에서 감소되다 정수면 부근인 P2에서 다시 증가되는 경향이 나타났다. 바람발생시

전반적으로 P2~P6 부재에서 파압이 증가되었으며 그 중 P5 지점에서 최대가 되었다. 하지만, 이론식에서는 해수에 직접적으로 노출되는 P4~P6 구간은 파압이 상대적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 정수면 부근인 P2 지점에서 최대 파압이 발생되어 실험결과와 비교함에 있어서 값에 차이가 발생되었다. 이상의 결과를 통해 파랑에 직접적으로 노출된 지점에서는 파압강도가 크게 나타났으며 정수면 부근에서도 상대적으로 큰 값이 발생하는 것을 알 수 있다. 이론식에 의한 결과와 무풍시의 결과를 비교하더라도 파압강도가 차이가 남을 알 수 있다. 이론식에서는 계측위치가 수면으로부터 이격될 경우 값이 작아지는 경향이 나타났으나 실험에서는 강한 처오름 또는 쇄파등의 현상에 의해 순간적인 파압분포가 증가되는 등 여러 가지 요인에 의해 실험값이 다소 크게 나타나는 것으로 분석된다. 또한, 풍속의 증가는 높은 처오름과 순간 월파량을 증가시켜 소파블록 마루부 이상의 지점에서 파압변동폭이 커지게 되는 현상을 야기했다(Fig. 9). 아울러, 쇄파, 중복파, 바람의 강도 등이 변화될 경우 이론식과의 차이는 증가되는 것을 알 수 있었으며, 각 부재에 작용하는 파압 검토시 복잡한 수리현상이 발생하는 조건에서는 이론식에 의한 파압을 예측하는 방법은 실제 현상과 다소 차이가 있는 것으로 판단 된다.

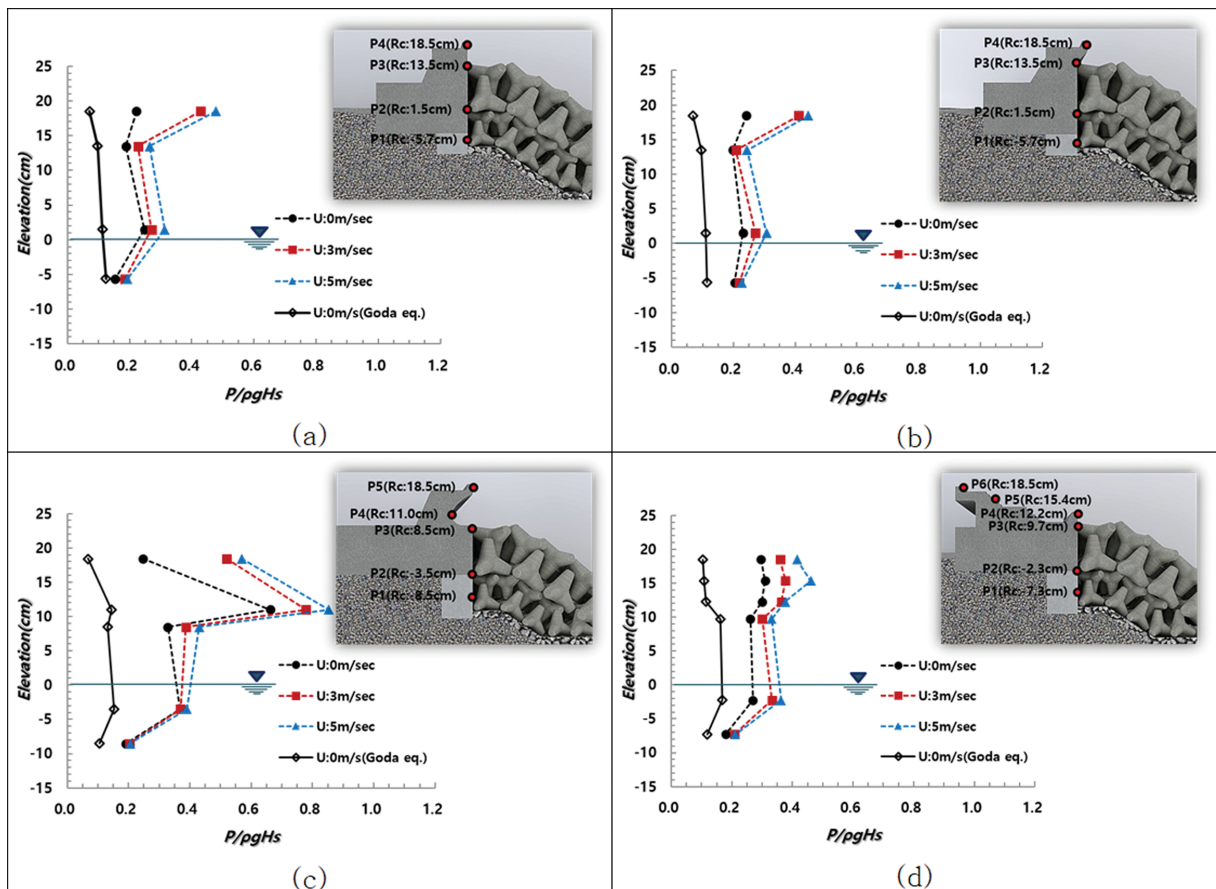


Fig. 9. Results of wave pressure measurement depending on the wind velocity change: Vertical type (a); Nabla type (b); Flare type (c); Front Inclined type (d).

5. 실험결과 분석

5.1 상치콘크리트 형상변화에 따른 월파량 검토

실험을 통해 도출된 값을 경험식에 적용하여 매개변수 변화에 따른 무차원값으로 비교하였다. Fig. 10(L)은 무차원화된 여유고(R_c/H_{m0})에 대하여 무차원 월파량($q/(\sqrt{g}H_{m0}^3)$)으로 나타낸 것으로 semi-logarithmic diagram을 이용하여 정리하였다. 앞서 언급한 바와 같이 상치콘크리트의 마루높이, 피복제의 종류, 조위, 실험파, 주기는 동일하지만 상치형상, 소파블록의 마루높이, 풍속의 변화에 따라 상치전면 파고 및 월파량 또한 다르게 나타나기 때문에 결과를 정리하면 Fig. 10, 11과 같다. 이상의 결과로부터, 풍속이 증가할수록 월파량이 증가하는 것을 알 수 있다. 상치형상에 따라서는 Type-A의 경우 무차원 월파량의 변동이 가장 크게 나타났으며, Type-D에서 가장 작은 범위의 값이 나타났다. 하지만 Y축의 범위를 고려한다면 Type B~D는 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. Table 2에 정리되어 있는 바와 같이 파라렛의 높이, 무차원 호안높이 및 형상, 상치의 돌출각도 등을 고려하였을 경우 그 결과를 보다 상세하게 비교할 수 있다. Fig. 10에 도시된 그래프는 다음의 식(Eurotop, 2018)을 이용한 결과이며, 식(3)은 식(4)~(6)을 이용하여 계산된다.

$$\frac{q}{\sqrt{g}H_{m0}^3} = 0.2 \exp\left(-2.28 \frac{R_c}{H_{m0}\gamma_v/\gamma_{par}/\gamma_{s0,par}}\right) \quad (3)$$

$$\gamma_v = \exp\left(-0.56 \frac{h_{wall}}{R_c}\right) \text{ for } \frac{h_{wall}}{R_c} < 1.24 \quad (4)$$

for $h_{wall}/R_c \geq 0.25$: $\gamma_{par} = 1.80\gamma_\varepsilon\gamma_\lambda$ with

$$\gamma_\varepsilon = 1.53 \times 10^{-4} \times \varepsilon^2 - 10^{-2} \times \varepsilon + 1 \text{ if } 15^\circ \leq \varepsilon \leq 50^\circ$$

$$\gamma_\varepsilon = 0.56 \text{ if } \varepsilon \geq 50^\circ$$

$$\gamma_\lambda = 0.75 - 0.20\lambda \text{ if } 0.125 \leq \lambda \leq 0.6 \quad (5)$$

$$\gamma_{s0,par} = 1.33 - 10s_{m-1,0} \quad (6)$$

Fig. 8에서도 나타났듯이, 상치형상변화에 따른 월파량은 무풍시의 조건 중 직립형상인 Type-A에서 가장 많이 발생되었으며, 월파량을 단순히 수치적으로 비교하였을 경우, Type-A > D > C > B 순이 되었다. U = 3 m/s의 조건에서도 동일하였으며, U = 5 m/s에서는 Type-A > D > C ≃ B가 되었다(Fig. 11). 일반적으로 Type-C가 월파저감에 가장 효과적일 것으로 여겨지지만 A, B, D 호안의 단면형상은 상치콘크리트 전면 에 거치되어 있는 소파블록의 마루부가 Type-C에 비하여 1.25 cm(Type-D), 5 cm(Type-A, B) 높을 뿐만 아니라, 높아

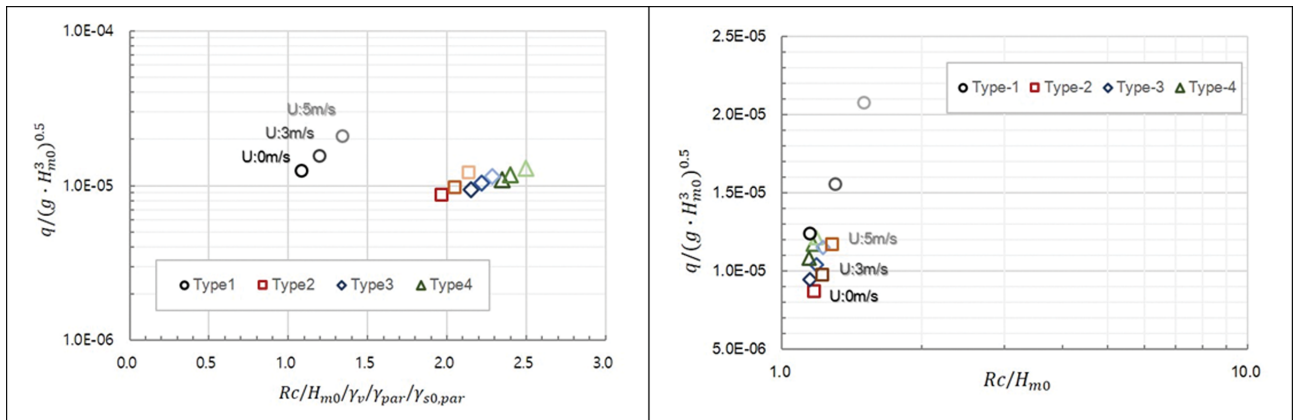


Fig. 10. Data set with profile and variation of wind velocity-corrected values (L), (R).

Table 2. Summary of parameters for experiment

Meaning	Symbol	Measured & fixed value
Slope angle of the revetment slope	$\cot(\alpha)$	1.48 [-]
Mean spectral wave period	$T_{m-1,0}$	1.60~1.83 sec
Dimensionless freeboard	R_c/H_{m0}	1.15~1.50 [-]
Wall height	h_{wall}	5~10 cm
Freeboard (tope of structure to SWL)	R_c	19.6 cm
Dimensionless wall height	h_{wall}/R_c	0.26~0.51 [-]
Spectral wave height	H_{m0}	14.17~16.31 cm
Water depth at toe of the structure	d	18.53 cm
Wave breaker parameter	$\xi_{m-1,0}$	1.32~1.54 [-]
Height of the nose	h_n	3.75~10.0 cm
Height ratio parapet (hn/hwall)	λ	0.42~1.00 cm
Nose angle parapet (in degrees)	ε	0~40°

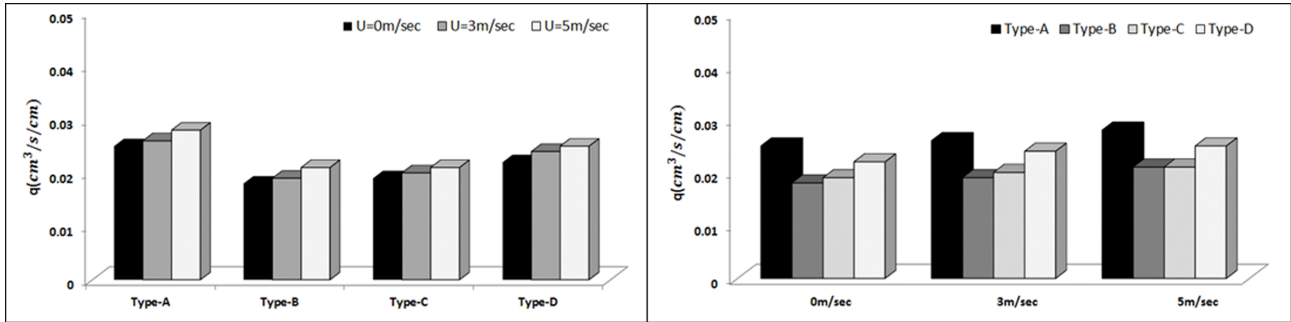


Fig. 11. Comparison results of wave overtopping discharge with shapes of seawall (L) & wind velocity (R).

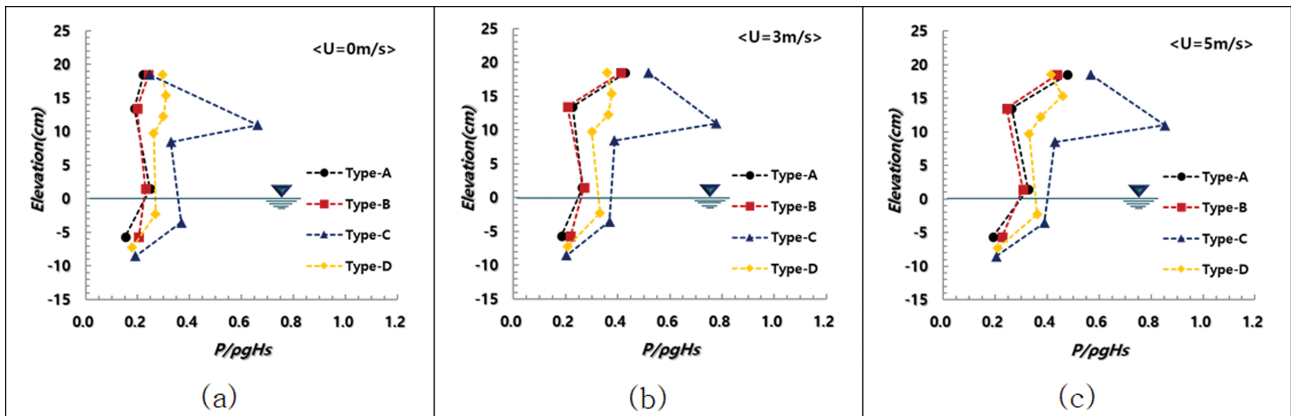


Fig. 12. Comparison Results of wave pressure measurement about wind velocity change: $U = 0$ m/s (a); $U = 3$ m/s (b); $U = 5$ m/s (c).

진 마루부는 소파블록 체적의 증가를 의미한다. 따라서, Type-C 단면은 다른 단면에 비해 고파랑의 쇄파지점이 상대적으로 호안과 가까워지기 때문에 파랑에너지의 영향을 더 받게 된다.

본 실험에 적용된 조건에서는 무풍시에는 Type-B에 비하여 월파량이 다소 많이 발생되나 풍속이 강해지는 조건에서 월파량 증감에 유리하게 작용하였다. 또한, 곡률의 각도와 돌출길이의 변화에 따라 월파발생이 변화될 것으로 판단되며 효과적인 월파저감을 위해서는 곡률형상의 개선이 요구된다. Type-B 단면의 경우 상치콘크리트 벽면 및 소파블록 경사면을 따라 이동되는 파랑의 처오름은 돌출부에 의해 제어되어 주로 바람의 영향이 적은 조건($U: 0 \sim 3$ m/s)에서 상대적으로 낮은 월파량이 발생되었다. 하지만 수면위로 노출되는 파랑의 윗부분(주로 파봉)은 상대적으로 바람의 영향을 많이 받기 때문에 파랑이 진행할 때 바람의 강도에 비례하여 수평성분이 증가된다.

따라서, 무풍시에 비하여 파속의 증가와 높은 처오름 현상은 월파량 증가에 직접적인 영향을 미치기 때문에 구조물 전면에서 발생하는 중복파는 내습하는 파랑과 바람의 영향에 의해 단일 파랑(single wave)에 대한 최대 월파량을 발생시킬 수 있다. 따라서, 평균 월파량과 비교시 그 차이가 상당히 클 것으로 예상되기 때문에 설계시 적절한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

5.2 상치콘크리트 형상변화에 따른 파압분포 검토

파압분포 비교결과 Fig. 12에서 보이듯이 정수면에 비하여 해수에 직접적으로 노출되는 구간에서 최대 파압이 발생하는 것을 알 수 있다. 특히, 파랑이 집중되는 Type-C($R_c: 11.0$ cm)의 곡률부와 파랑의 처오름에 의한 영향을 받는 Type-A, B의 마루부($R_c: 18.5$ cm) 및 Type-D의 상단부($R_c: 15.5$ cm)가 대표적이다. 아울러, 구조물에 내습하는 파랑이 바람에 영향을 받을 경우 전파속도가 가속화되며, 구조물에 작용하는 파력은 무풍시에 비하여 상당히 커지는데, 실험결과에서도 나타났듯이 쇄파력이 작용할 때 그 양상이 더욱 증가되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

호안의 상치형상 변화(Type-A~D)에 따른 수리현상을 고찰하고자 파랑과 바람이 공존하는 조건에서 수면변동, 반사계수, 월파량 및 파압분포를 검토하였다. 실험결과 Type-A의 조건에서 가장 많은 월파량이 발생되었으며 상치형상에 따라 Type-A > D > C > B 순으로 나타났다. 파압의 경우 Type-C의 단면에서 가장 크게 나타났으며, Type-C > D > A \approx B 순으로 나타났다. 풍속의 증가($U = 0$ m/s > 5 m/s)에 따른 수리특성 결과도 비례하여 증가되었으며, 평균 월파량의 경우 Type-A > D > B \approx C, 파압의 경우 무풍시와 동일하게 Type-C >

Table 3. Rate of change in hydraulic characteristics with wind speed variation (0 m/s->5 m/s)

Type of Seawall	$\Delta\eta$ (%)	ΔK_R (%)	Δq (%)	ΔP_{\max} (%)
Type-A	-2.22 (41.2%)	0.019 (4.2%)	0.003 (12.0%)	3.88 (114.8%)
Type-B	-0.83 (15.8%)	0.018 (4.0%)	0.004 (23.5%)	2.96 (80.6%)
Type-C	-0.64 (11.9%)	0.033 (7.0%)	0.002 (10.5%)	2.90 (28.8%)
Type-D	2.28 (42.0%)	0.028 (6.0%)	0.003 (13.6%)	1.16 (25.5%)

※ 제시된 값은 변화량(5 m/s-0 m/s) 및 변화율 수치임.

D > A ≍ B 순서로 나타났다. 하지만 바람발생에 따른 수리특성 증가현상을 상치형상변화와 상호 비교해보면 월파랑의 경우 Type-B > D > A ≍ C, 파압의 경우 Type-C > A ≍ B > D의 순이 되었다. Table 3에 정리되었듯이 Type-A에서는 수리특성의 변화가 풍속이 증가 될수록 무풍시대비 4~114% 범위 내에서 변화가 발생되었으며 Type-B의 경우 4~80%, Type-C에서는 7~29%, Type-D는 6~42%의 변화량이 발생되었다. 단면형식에 따라서는 Type-A에서 가장 많은 변화가 발생되었으며 특성치로는 파압에서 가장 큰 변화가 나타났다. 여기서 수면변동 $\Delta\eta$ 는 주파수 스펙트럼값의 차이이며(Fig. 6), ΔK_R 및 Δq 는 전체 실험안에 대한 평균값, ΔP_{\max} 의 경우 각 단면에서 발생하는 최대파압간의 차이를 의미한다.

따라서, 풍속의 증가는 호안의 형상에 따라 예측값이 다르게 나타났으나, 파랑의 초오름과 구조물에 작용하는 파력의 증가는 그 형상에 관계없이 공통적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 본 실험은 제한된 범위에서 진행되었으나 바람강도의 변화에 따라 수리특성 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 실내실험에서의 결과는 현지의 상황과 일치한다고 볼 수 없으나(Baldock et al., 2011) 실험결과의 정성적인 해석을 통해 실제현상의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 아울러, 실험결과를 토대로 파랑과 바람의 작용이 구조물의 안정성과 수리특성에 미치는 영향에 대해 다각도의 검토가 추가적으로 진행되어야 하며 이를 기반으로 효율적인 단면의 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

References

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116(2016), 236-257.
- Baldock, T., Alsina, J. and Caceres, I. (2011). Large-scale experiments on beach profile evolution and surf swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves. *Coastal Engineering*, 58(2), 241-227.
- Bruce, T., Van Der Meer, J.W., Pullen, T. and Allsop, W. (2018). Wave Overtopping at Vertical and Steep Structures, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Chapter 16, 411-439.
- Carrasco, A.R., Reis, M.T., Neves, M.G., Ferreira, Ó., Matias, A. and Almeida, S. (2018). Overtopping hazard on a rubble mound breakwater. *Journal of Coastal Research*, 66(SI), 247-252.
- Doorslaer, K., Rouck, R., Audenaert, S. and Duquet, V. (2015). Crest modifications to reduce wave overtopping of non-breaking waves over a smooth dike slope. *Coastal Engineering*, 101(2015), 69-88.
- EurOtop (2018). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual.
- Franco, L., De Gerloni, M. and Van der meer, J.W. (1994). Wave overtopping on vertical and composite breakwaters. *International Conference on Coastal Engineering*, 1030-1045.
- Fukuda, N., Uno, T. and Irie, I. (1974). Field observations of wave overtopping of wave absorbing revetment. *Coastal Engineering in Japan*, 17, 117-128.
- Goda, Y. (1974). New wave pressure formulae for composite breakwaters, *Proceedings. 14th International Conference on Coastal Engineering*, 1702-1720.
- Goda, Y. (2010). "Random Seas and Design of Maritime Structures." World Scientific Publishing Co., Singapore.
- Hiroi, I. (1920). On a Method of Estimating the Force of Waves, *Memoirs of Engg. Faculty, University of Tokyo*, 10(1), 1-19.
- Jung, W.M., Oh, S.-H. and Lee, D.Y. (2007). Abnormally high waves on the east coast. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(4), 295-302.
- Kerpen, N., Schoonees, T. and Schlurmann, T. (2019). Wave overtopping of stepped revetments. *Water* 2019, 11, 1035; doi:10.3390/w11051035.
- Kim, K., Kwon, O. and Shim, K. (2019). Analysis on the stability of rubble mound breakwater and wave overtopping phenomenon. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(7), 2349-2358.
- Li, L., Tuan, S., Amini, F. and Tang, H. (2015). Numerical study of combined wave overtopping and storm surge overflow of HPTRM strengthened levee. *Ocean Engineering*, 97(2015), 1-11.
- Lorenzoni, C., Postacchini, M., Brocchini, M. and Mancinelli, A. (2016). Experimental study of the short-term efficiency of different breakwater configurations on beach protection. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2, 195-210.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 15th International Conference on Coastal Engineering ASCE*, Sydney, Australian, pp. 154-172.
- Minikin, R.R. (1963). *Winds, Waves and Maritime Structures* 2nd ed., Griffin, London.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2019). Design criteria for harbors and fishery ports (in Korean).
- Murakami, K., Irie, I. and Kamikubo, Y. (1996). Experiments on a

- non-wave overtopping type seawall. International Conference of Coastal Engineering, 1840-1851.
- Murakami, K., Sugimoto, N., Endo, M., Maki, D. and Takehana, N. (2019). Effect of Wind Velocity on Wave Overtopping, Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts, Hanoi, Vietnam, September 25-28, pp. 57-63.
- Muraleedharan, G., Kurup, P.G., Sinha, M., Rao, A.D., Latha, G. and Dube, S.K. (2010). A theoretical spectrum for multi-peaked energy sea states. Journal of Oceanography and Marine Science, 1(1), 11-21.
- Pearson, J., Bruce, T., Allsop, W., Kortrenhaus, A. and Van der meer, J.W. (2004). Effectiveness of recurve walls in reducing wave overtopping on seawalls and breakwaters. International Conference of Coastal Engineering, 4404-4416.
- Pullen, T., Alisop, W., Bruce, T. and Pearson, J. (2009). Field and laboratory measurement for mean overtopping discharges and spatial distributions at vertical seawalls. Coastal Engineering, 56(2), 121-140.
- Sainflou, M. (1928). Essai sur les Digues Maritimes Verticales. (Test on vertical sea dikes) Annales des Ponts et Chaussees 98, 5-48 (in French).
- Shim, K.T., Kim, K.H. and Park, J.H. (2019). The effectiveness of adaptive beach protection methods under wind application. Journal of Marine Science and Engineering, doi:10.3390/jmse7110385, 1-17.
- TAW (2002). Technical Report. Wave Runup and Wave Overtopping at Dikes. Technical Advisory Committee on Flood Defense, Delft.
- Yamashiro, M., Yoshida, A., Yoshioka, T., Hashimoto, H. and Moriyama, Y. (2005). Effect of Wind to Wave-overtopping and Water Spray on non Wave-overtopping Type Seawall in Deep water, Ser. B2 (Coastal Engineering), 21, 611-616 (In Japanese).
- Wang, S.K., Hus, T.W., Weng, W.K. and Ou, S.H. (2008). A three-point method for estimating wave reflection of obliquely incident waves over a sloping bottom. Coastal Engineering, 55(2008), 125-138.
- Wheeler, D. and Wilkinson, C. (2013). From Calm To Storm : The Origins of The Beaufort Wind Scale. The Mariner's Mirror, 90(2), 187-201.

Received 20 November, 2020

1st Revised 15 December, 2020

2nd Revised 22 December, 2020

3rd Revised 23 December, 2020

Accepted 23 December, 2020