

기포영상유속계와 복합파고계를 활용한 경사식 해안 전면에서 쇄파의 형태에 따른 충격쇄파압의 분류

Experimental Study on Impact Pressure at the Crown Wall of Rubble Mound Seawall and Velocity Fields using Bubble Image Velocimetry

나병준* · 고행식**
Byoungjoon Na* and Haeng Sik Ko**

요지 : 본 연구에서는 테트라포드로 피복된 경사식 마운드 위의 직립벽에 작용하는 충격쇄파압을 쇄파 형태에 따라 구분하기 위해 규칙파를 생성하고 충돌 직전의 유속장과 기포분율을 측정하였다. 유속장 측정을 위해 쇄파 중 발생하는 기포의 움직임을 추적하는 기포영상유속계를 사용하고 기포분율 측정을 위해 복합파고계 기법(Na and Son, 2021)을 활용하였다. 측정된 입사파의 주기가 짧을수록 최대평균유속은 사면에서 파속에 비해 적은 감소율을 보였지만 파랑이 사면을 따라 진행하며 쇄파가 더 빨리 발생하여 기포분율이 증가하였고 결과적으로 중복파압형태의 파압이 작용하였다. 주기가 큰 실험파의 경우 충돌 전 유입되는 공기가 적어 flip-through 형태(Cooker and Peregrine, 1991)의 흐름양상을 보였고, 파압이 급격하게 증가함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 충격쇄파압, 기포영상유속계, 기포분율, flip-through

Abstract : To investigate varying wave impact pressure exerting at the crest wall of rubble mound seawall, depending on breaking wave properties, regular waves with different wave periods were generated. Wave velocity fields and void fraction were measured using bubble image velocimetry and simple combined wave gauge system (Na and Son, 2021). For the waves with shorter wave period, maximum horizontal velocity was less reduced compared to incident wave speed while breaking-induced air entrainment was occurred intensely, leading to a significant reduction of wave impact pressure at the crest wall. For the waves with longer wave periods, less air wave entrained and the wave structure followed a flip-through mode (Cooker and Peregrine, 1991), resulting in an abrupt increase of the impact pressure.

Keywords : impact breaking wave pressure, bubble image velocimetry, void fraction, flip-through

1. 서 론

이상파랑은 연안 및 해안구조물 설계에 있어서 고려해야 할 중요한 요소 중에 하나이다(Ryu et al., 2007). 이상파랑이 연안 및 해안구조물에 내습하면 구조물 전면에 큰 충격과 이에 따른 손실을 유발하고 높은 파고로 인한 월파가 발생하여 구조물 상부 및 배후면 안정성에 영향을 줄 수 있다(Ryu and Lee, 2008). 특히, 해안구조물 전면 근처에서 이상파랑의 쇄파가 발생하면 구조물에 가해지는 압력이 순간적으로 증가하는 충격쇄파압(impact breaking pressure)으로 구조물 상부 및 배후면에 급격한 손상을 가져올 수 있다. 충격쇄파압은 충격조건에 따라 비쇄파 조건의 정수압에 비해 약 10~100배 정

도로 크다고 알려져 있다(Lugni et al., 2006). 구조물에 작용하는 쇄파의 영향은 발생 위치에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다(Cooker and Peregrine, 1991; Hattori et al., 1994). 첫 번째로 전복-통과(Flip-through)는 파곡이 파봉보다 앞서 구조물에 접근하면서 파곡으로 인해 직립벽을 타고 올라가는 제트가 발생하고 뒤이어 오는 파봉과 직립벽 상단에서 충돌하면서 부서지는 형태이다(Cooker and Peregrine, 1991). 이 때, 쇄파점(파봉의 전면이 수직이 되는 순간)이 충돌 전에 나타나게 되면 공동(air cavity)를 포함한 상태로 충돌이 일어날 수 있고 이는 공동이 포함되지 않고 충돌이 일어나는 경우에 비해 충격쇄파압이 크다고 보고되었다(Hattori et al., 1994). 두 번째는 쇄파가 직립벽 도달 이전에 이미 발생하여 완전히

*한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 선임연구원(Corresponding Author: Byoungjoon Na, Senior Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeyang-ro, Youngdo-gu, Busan 49111, Korea. Tel: +82-51-664-3544, bjna@kiost.ac.kr)

**한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 선임연구원(Senior Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

발달된(fully developed) 쇄파가 직립벽과 충돌하는 경우이다. 이러한 충돌로 인한 직립벽에 가해지는 압력 산정에 충돌 직전 쇄파의 운동량이 중요한 인자가 될 수 있다. 이 때, 쇄파는 상당한 기포를 연행하거나 액적(droplet)을 수반하고 물과 공기가 섞인 다위상(multiphase) 상태의 흐름이기 때문에 정확한 운동량 산정을 위해 쇄파 유속장과 흐름밀도의 측정이 필요하다(Ryu and Lee, 2008).

입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV)는 다양한 유속장 측정에 쓰이는 대표적인 비접촉(non-intrusive) 실험기법이지만 기포가 많은 영역에서 레이저광의 산란으로 인해 유속장 측정이 어렵기 때문에 기포영역이 넓은 권파(plunging breaker)나 월파의 유속측정에 사용되기 어렵다. 이에 Ryu et al.(2005)는 BIV(bubble image velocimetry)라는 기포를 이용한 상호상관기법을 제안하고 구조물 주위 쇄파에 의해 발생한 다위상유체의 유속과 거동을 분석하였다. BIV는 전후면 양측 조명을 이용하여 부유입자 대신에 기포나 물-공기의 경계에 생성되는 화상의 조직(texture)를 추적하여 다위상흐름의 유속을 측정하는 방법으로 PIV와는 달리 레이저광이 필요하지 않다. BIV는 구조물이 없는 심해 권파(Na et al., 2016), 연안 쇄파(Pedrozo-Acuna et al., 2011), 계류된 구조물의 월파(Chuang et al., 2015), 액적화된 개수로 흐름 및 수력점프(Lin et al., 2012), 탱크 내부 슬로싱(Song et al., 2013) 등에 성공적으로 활용된 바 있다.

다위상유체의 기포분율에 관해서 전기적, 광학적, 음향학적 방법 등 다양한 방식으로 구조물이 없는 쇄파를 대상으로 많은 실험적 연구가 수행된다(Deane and Stokes, 2002; Cox and Shin, 2003; Rojas and Loewen, 2010; Na et al., 2020 등) 반면에, 구조물이 있을 경우의 흐름에 관한 연구는 상대적으로 제한적이다. 쇄파의 기포분율에 관한 대부분의 연구는 난류도 증가로 인한 에너지 소산과 유사 부유의 영향을 검토하기 위한 것이었기 때문에 이들 연구가 월파 영역으로 확장되지 않았던 것으로 판단된다(Ryu and Lee, 2008). Ryu and Lee(2008)는 직립 구조물 전면에서 발생하는 권파에 의한 월파의 기포분율을 광섬유반사율계(Fiber optics reflectometry)를 사용하여 측정하고, 이를 바탕으로 흐름율과 운동량을 산

정하였다. Lugni et al.(2006)는 쇄파의 충돌 조건에 따라 직립벽에 가해지는 파압이 정수압의 10~100배에 이를 수 있다고 보고하였고, 이는 기포분율과 밀접한 관련이 있음을 실험을 통해 검증하였다. Lugni et al.(2006)는 쇄파 중 발생하는 기포의 쿠션효과로 인한 충격의 저감과는 반대로 압축된 공기로 인해 직립벽에 가해지는 압력이 극대화되는 결과를 제시하였다. Bullock et al.(2009)은 흐름의 전기전도도 측정값을 맥스웰 방정식을 사용하여 기포분율로 환산하여 충격파압간의 관계를 분석하였다. 하지만 Lugni et al.(2006)은 초고속 카메라를 통한 대략적인 기포분율만을 측정하였고, Bullock et al.(2009)은 환산과정에서 흐름을 공간 균일(homogenous)하다고 가정했기 때문에 기포분율 측정값이 다소 부정확할 수 있다고 해당 논문에 명시하였다. 또한, 이러한 연구들은 쇄파가 단순한 직립벽에 접근할 때의 분석이 대부분이고, 따라서 해당 결과들을 직접적으로 경사식 마운드 위의 직립벽의 경우에 적용하기는 어려울 것으로 판단된다.

본 연구에서는 쇄파 형태에 따른 사석과 테트라포드로 피복된 경사식 마운드 위의 직립벽에 작용하는 파압을 분석하기 위해 직립벽에서의 파압을 측정하고 기포를 이용한 영상유속계기법(BIV)과 복합파고계 기법(Na and Son, 2021)을 사용하여 쇄파-직립벽 충돌과정에서 쇄파의 속도장 및 기포분율을 측정한다.

2. 실험

2.1 실험시설 및 실험모형

본 실험은 한국해양과학기술원 수리실험동의 길이 50 m, 너비 1.2 m, 높이 1.6 m인 2차원 단면 조파수조에서 수행하였다. 조파수조 상류부에는 파를 생성하면서 동시에 반사파를 능동적으로 흡수하는 기능이 통합된 피스톤식 조파기가 장착되어 있고, 하류부에는 반사파를 수동적으로 제어하는 다공성 소파구조물이 놓여있다(Ko et al., 2022). 조파기로부터 약 10~20 m 구간에 저면경사(Fig. 1)는 파랑이 외해로부터 수심이 얕은 연안으로 진입하며 발생하는 천수 효과를 고려하기 위해 설치되었다. 경사식 호안의 직립벽 전면 모서리는 조파

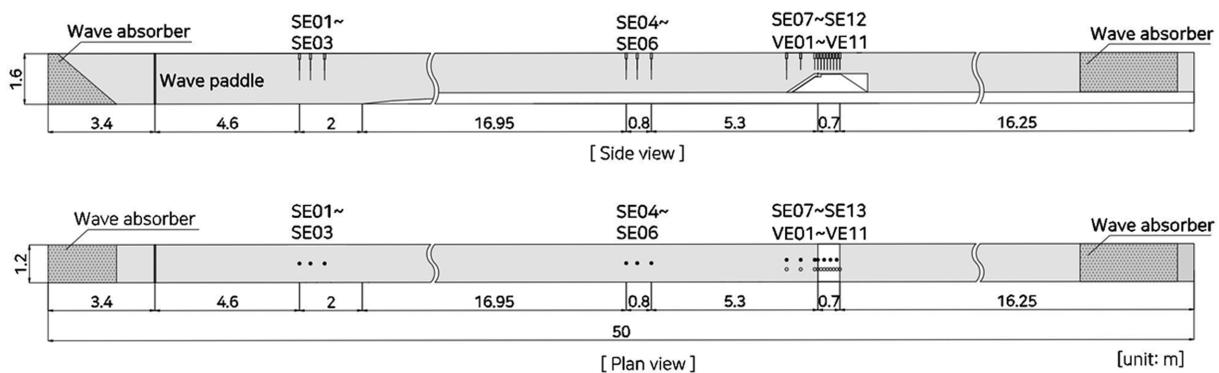


Fig. 1. Schematic of the wave flume and experimental setup (unit: m).

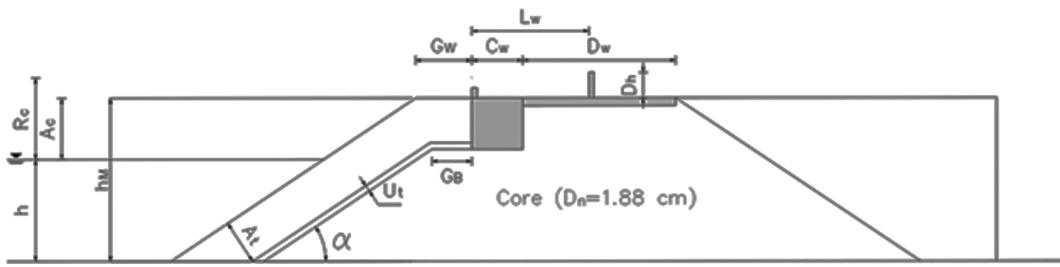


Fig. 2. Geometrical parameters of the model.

수조 상류부로부터 33.3 m 떨어진 곳에 설치하였다. Fig. 2는 경사식 호안 모형과 매개변수에 대한 정의를 나타낸다. 마운드는 사석으로 구성되었고, 그 위에 아크릴 재질의 상부구조물과 포장체 배후면이 설치되었다. 모든 실험 케이스들에서 사석 마운드의 전면 경사는 1:1.5^o이고, 마운드 전사면은 평균 중량 30 g의 사석층 및 중량 250 g의 테트라포드로 피복되었다. 상부구조물의 폭(C_w)은 0.10 m, 배후면 포장체의 폭(D_w)은 0.30 m, 제체사석의 어깨폭(G_B)은 0.11 m, 중간피복층 높이(U_t)는 0.012 m, 배후면 포장체 두께는 0.015 m, 피복층 두께(A_t)는 0.089 m, 여유고(R_g)는 0.13 m, 상대여유고는 사면 경사는 1:1.5로 동일하게 유지되었다. 수심(h)은 0.46 m로 유지하였다.

2.1 실험장치 및 측정기법

쇄파 형태에 따른 직립벽에서 측정된 파압 변화를 조사하기 위해 예비실험을 통해서 주기와 파고를 다르게 하여 규칙파를 조파하였고, 이 중 형태 변화가 뚜렷이 구분되는 3개의 규칙파(Table 1)를 분석하였다. RW1, RW2, RW3는 모두 동일한 파고($H = 0.18$ m)를 가지지만 주기를 변화시켜 조파하였다. 모든 실험파는 쇄파 유사성 매개변수(surf-similarity parameter, ξ)의 범위로 보아 쇄파 중 공기유입이 많은 권파에 해당하였다. 파랑 수위 변화를 계측하기 위해 총 14개의 파고계를 Fig. 1과 같이 설치하였다. 본 실험에서는 조파기의 성능을 검증하기 위해 조파기 전면 근처에 용량식 파고계(SE01~03)을 위치하였고, 입사파의 속성을 측정하기 위해 경사식 호안의 경사 마운드와 바닥면이 만나는 점으로부터 약

Table 1. Incident wave properties

| Case | T [s] | H [m] | L [m] | C [m/s] | ξ |
|------|---------|---------|---------|-----------|-------|
| RW1 | 1.8 | 1.8 | 5.1 | 2.8 | 1.1 |
| RW2 | 2.2 | 1.8 | 7.6 | 3.4 | 1.4 |
| RW3 | 1.4 | 1.8 | 3.1 | 2.2 | 0.9 |

실험과 기준 약 4파장 정도 조파기쪽으로 떨어진 곳에 용량식 파고계(SE04~06)를 설치하였다. 특히, 파랑이 경사식 호안에 접근하면서 파고의 상승에 의해 쇄파가 발생하는 경우에 유입되는 다위상유체 중 공기량의 백분율인 기포분율(void ratio)의 시공간적 변화를 측정하기 위해 용량식 파고계와 저항식 파고계를 파랑의 진행 방향뿐만 아니라 폭 방향으로도 나란히 배치하였다(SE07~13, VE01~VE11).

저항식 파고계는 양쪽 쇠막대 간의 저항(resistance) 차이를 수위로 환산하고 용량식 파고계는 축전기 역할을 하는 철사를 이용해 전기용량(capacitance)을 수위로 환산한다(Hughes, 1996). 이러한 측정원리의 차이로 인해 Fig. 3과 같이 권파(plunging breaker)의 공동(air cavity)이 측정구간에 존재할 때, 저항식 파고계는 공동의 수직높이를 뺀 저항값을 도출하는 반면에 용량식 파고계는 전기용량의 최대값을 기록한다. 별도로 배치된 저항식과 용량식 파고계를 통해 측정된 수위 간의 차이는 기포분율과 비례함이 Na and Son(2021)에서 검증된 바 있다. 복합파고계를 통한 기포분율의 측정은 점 측정방법인 광섬유반사율계(Chang et al., 2003)와는 다르게 수파의 수직 높이 전체에 대한 수심평균기포분율(depth-averaged void fraction)을 측정할 수 있고, 수위 측정을 위해 이미 설

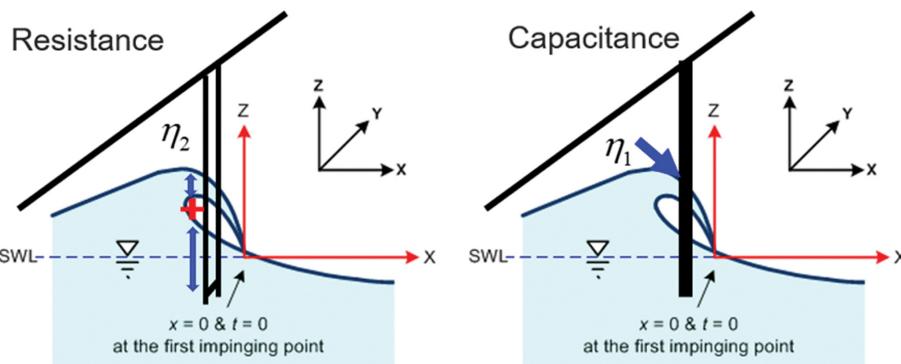


Fig. 3. Difference in measuring surface elevation using resistance and capacitance wave gauges.

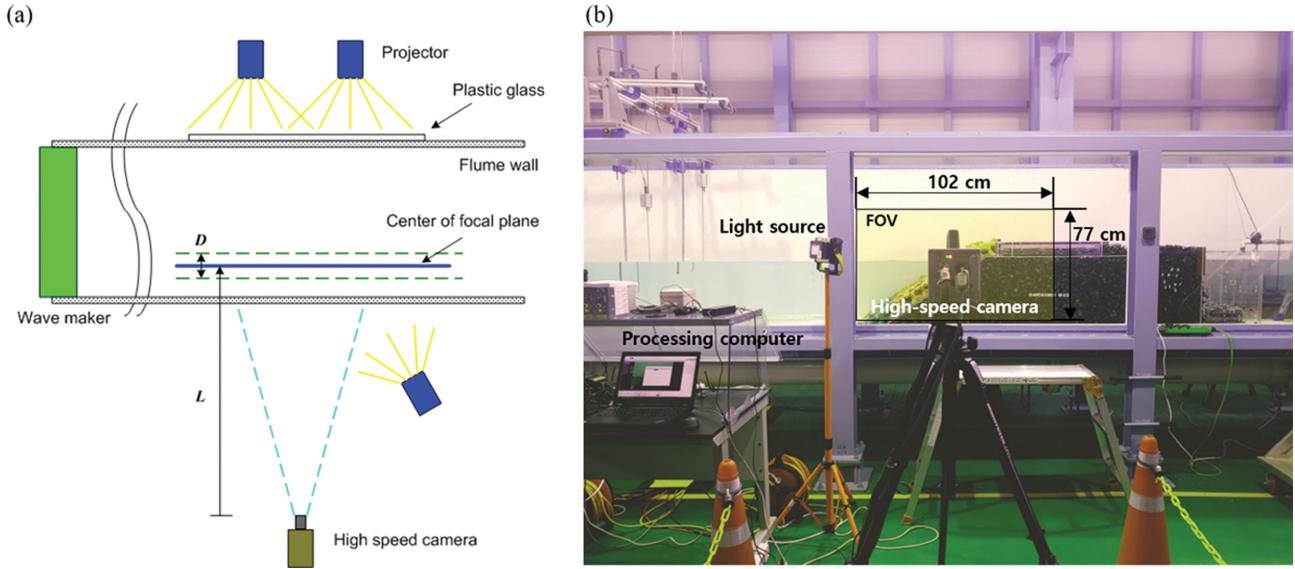


Fig. 4. (a) Schematic of BIV setting, (b) experimental configuration and the size of field of view (FOV).

치된 파고계를 이용하여 추가로 기포분율을 측정할 수 있다는 점에서 효율적이다.

경사식 호안 상부구조물 전면에 파압계는 천단으로부터 각각 1.2 cm, 3.87 cm, 그리고 7.62 cm 높이에 설치하였다. 예비실험을 통해 동일한 규칙파를 조파하고 직립벽 최상단에서 측정된 파압 시계열을 분석한 결과 독취율이 1200 Hz일 때에 비해 600 Hz일 때 충격쇄파압 형태 파압 형상이 나타나지 않는 경우가 많았다. 이는 파압의 충격유지시간이 1/600 초보다 짧을 수 있다고 판단된다. 이 밖에도, Bullock et al. (2007)에서 언급한 바와 같이 연속된 규칙파 중 이전의 파와 경사식 호안과의 상호작용으로 생성된 난류와 반사파도 파압 첨두값의 변동성에 영향을 미친다고 알려져 있다.

본 연구에서는 입사파가 사면에 접근하여 발생하는 쇄파의 연행기포영역의 유속장을 얻기 위하여 BIV기법(Ryu et al., 2005)을 사용하였다(Fig. 4). 광원은 수조 후면 대각선 상단에서 내려오는 보통 전구와 수조 전면에서 사선으로 측정영역을 비추는 할로겐 전구를 사용하였다. 광원의 균일한 산란을 위해 수조 뒤에 약 2 mm의 두께의 백색 아크릴판이 설치되었다. 분석에 사용된 화상은 $f/1.8$ 의 조리개값을 가지는 105 mm 초점렌즈를 장착한 고속카메라로 기록하였다. 고속 카메라는 최고 1280×1024 픽셀의 해상도와 8bit의 분해능을 가지며, 해당 해상도에서 최고 2,000 fps를 갖는다. 본 연구에서는 1024×768 픽셀의 해상도를 갖는 화상을 500 fps의 속도로 측정하였다.

BIV 기법에 의해 촬영된 화상은 64×64 픽셀의 크기를 갖는 초기조사구간(initial interrogation window)과 32×32 픽셀의 최종조사구간(final interrogation window)의 조건을 적용하였다. 이 때, 조사구간의 크기를 추적입자의 개수에 따라 최적화시키는 적응조사기법(adaptive interrogation scheme)을 사용하고 주변조사구간과 50%의 화상중첩하여 상호연관을 통

해 유속장을 계산하였다. 또한, Median Filter를 이용하여 그려진 속도벡터들을 제거하고, 제거된 속도벡터는 주변 속도벡터들을 이용한 크린징 보간법(kriging interpolation)으로 대체하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 기포분율

Fig. 5a는 RW1의 경우에 경사가 수조 바닥과 접하는 지점(조파기로부터 28.79 m)에서 저항식 파고계로 계측한 수위(η_{RWG}), 용량식 파고계로 계측한 수위(η_{CWG})와 그 차이($\eta_{CWG} - \eta_{RWG}$)이다.

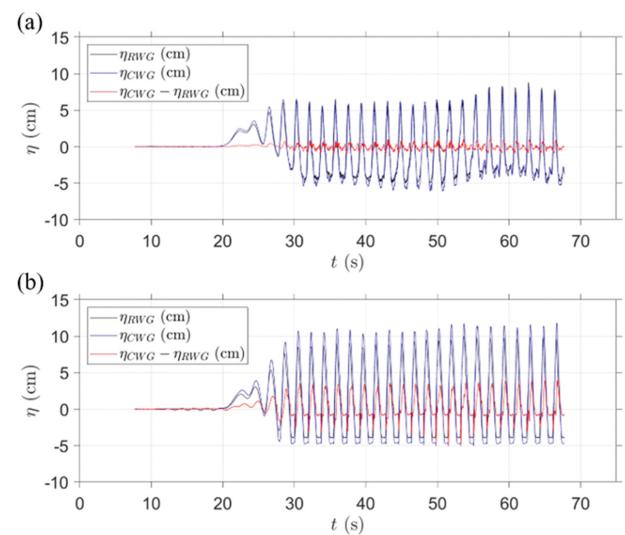


Fig. 5. Measured surface elevation using the resistance wave gauge (η_{RWG}), capacitance wave gauge (η_{CWG}), and the aerated depth ($\eta_{CWG} - \eta_{RWG}$) measured at the (a) start of the mound (SE07 and VE01), (b) middle of the mound (SE08 and VE02) for RW1.

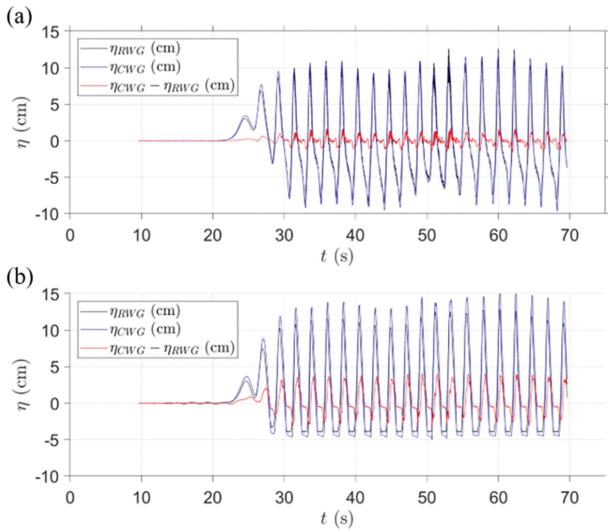


Fig. 6. Measured surface elevation using the resistance wave gauge (η_{RWG}), capacitance wave gauge (η_{CWG}), and the aerated depth ($\eta_{CWG} - \eta_{RWG}$) measured at the (a) start of the mound (SE07 and VE01), (b) middle of the mound (SE08 and VE02) for RW2.

η_{RWG})를 도시하였다. 파고계와 파압계는 조파기의 작동과 함께 계측이 시작되는 시간동기화가 되어있어 $t = 0$ s는 조파기가 작동되는 순간을 의미한다. 첨두값의 차이가 크지 않기 때문에 해당 지점에서는 공기유입이 적다고 보여지고 기포분율이 0에 가까운 쇄파 이전의 흐름이 관측되었다. 또한, 파봉이 뾰족하고 파곡이 넓적한 형태는 이 지점이 파랑 전사면이 정수면과 거의 수직이 되는 쇄파점에 가까운 것으로 판단된다. 이에 반해, Fig. 5b에 나타나듯이 파랑이 진행하여 경사면의 중간지점에 도달했을 때 수위차($\eta_{CWG} - \eta_{RWG}$)는 평균 약 3 cm에 이르고 이 경우 기포분율은 약 $(\eta_{CWG} - \eta_{RWG}) / \eta_{CWG} = 0.29$ 로 계측되었다. Bullock et al.(2007)에서는 이를 다량의 공기유입(high-aeration) 상태로 정의하였고, 이 경우 파압이 순간적으로 증가하는데 걸리는 시간이 상대적으로 길다고 (100~450 ms) 보고하였다.

Fig. 6는 RW2를 생성하고 동일한 지점에서 측정한 수위값을 나타낸다. 경사 시작지점에서는 RW1과 마찬가지로 기포분율이 크지 않기 때문에 공기유입이 거의 없다고 보여진다. 주목할 부분은 이 경우에는 경사면의 중간지점에서도 수위차는 평균 약 3 cm로 RW1의 경우와 유사하지만 기포분율은 약 $(\eta_{CWG} - \eta_{RWG}) / \eta_{CWG} = 0.05$ 로 Bullock et al.(2007)에 따르면 소량의 공기유입(low-aeration) 상태로 분류되고 파압 증폭 시간이(80~200 ms) 정도로 짧기 때문에 교회 첨탑의 형태를 가진 파압 시계열이 관측된다고 설명하였다. Cooker and Peregrine(1991)에 따르면 파랑과 직립벽의 충돌 과정에서 공기유입이 없거나 RW2처럼 매우 적은 경우를 전복-통과(Flip-through) 충돌이라고 정의하였다.

Fig. 7은 RW3에 해당하는 수위 시계열을 보여준다. 앞선 RW1과 RW2와 다르게 경사 시작지점부터 저항식과 용량식

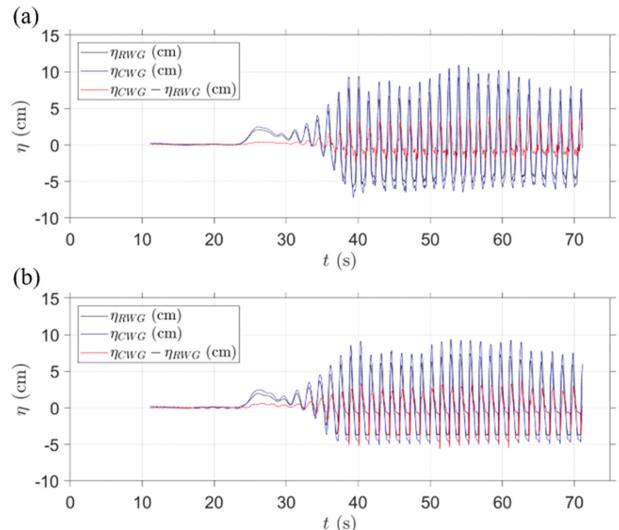


Fig. 7. Measured surface elevation using the resistance wave gauge (η_{RWG}), capacitance wave gauge (η_{CWG}), and the aerated depth ($\eta_{CWG} - \eta_{RWG}$) measured at the (a) start of the mound (SE07 and VE01), (b) middle of the mound (SE08 and VE02) for RW3.

파고계의 측정값에 상당한 차이가 있고 평균 기포분율이 약 0.51에 이른다. 파랑이 경사를 따라 진행하면서 경사 중간지점에서 크게 다르지 않은 평균 기포분율인 0.49로 계측되었는데 이는 순수한 쇄파 진행과정에서 수심평균 기포분율이 자기상사(self-similarity)를 따르는 것과 관계가 있는 것으로 보여지고 이는 RW3의 경우 충돌전까지 공기유입에 관해 순수 쇄파의 발달과정을 따르는 것으로 판단된다. Hattori et al. (1994)과 Bullock et al.(2007)은 이와 같은 충돌양상의 결과로 직립벽에서 파압이 상대적으로 매우 크게 계측됨을 보여주었다.

3.2 유속장과 파압

Fig. 8은 RW1가 경사식 호안의 직립벽에 충돌 전후의 순간적인 유속장을 연속적으로 도시한 것이다. 쇄파가 충돌 이전에 이미 발생하여 직립벽에 접근하는 수괴는 영상을 기반으로 권파의 경우 튀어나가는 스플래쉬업 형태로 판단되고, 구조물이 없는 경우 스플래쉬업의 최대유속은 파속의 2.14배에 달하기 때문에 에너지가 소산되었음에도 불구하고 수평방향 운동량이 유지되고 있다. 직립벽 부근에서 속도벡터의 주된 방향은 구조물 천단부를 향하고 있고(Fig. 8c), 수괴가 직립벽에 충돌한 직후에 연직방향 운동량으로 전환되어 쳐오르는 유속장이 나타난다(Fig. 8d).

Fig. 9의 RW2의 경우를 보면 충돌 직전에 수평방향 유속장과 쳐오르는 유속장이 동시에 나타난다(Fig. 9c). 이러한 흐름의 형태는 Cooker and Peregrine(1991)에서 정의했던 전복-통과(Flip-through)에 해당함을 확인할 수 있고 운동량의 수직성분이 RW1에 비해 작아서 충돌과정에서 연직방향 운동량으로의 전환되는 크기가 클 것으로 판단된다. Fig. 9d에서

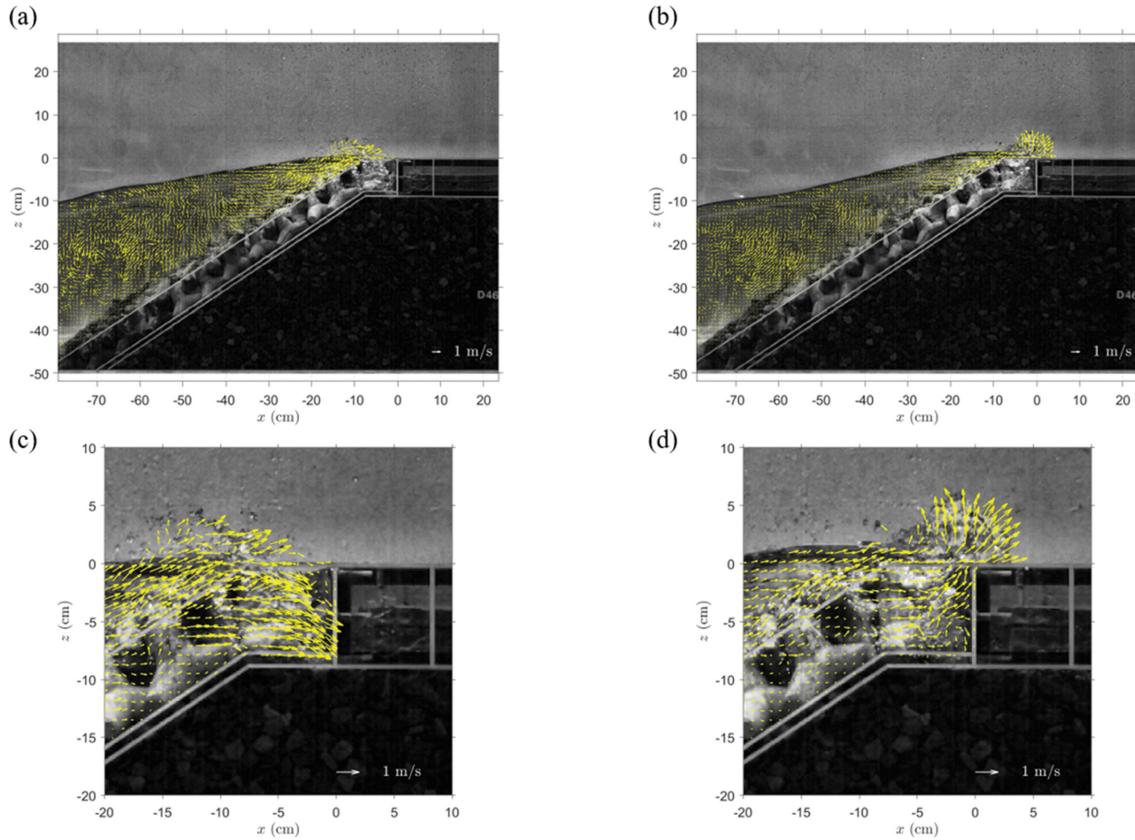


Fig. 8. Velocity fields for RW1 at (a, c) $t/T = 17.95$ and (b, d) $t/T = 18.01$. (c, d) Velocity vectors in the aerated region are shown in detail. Note that only one half of the vectors are plotted for brevity.

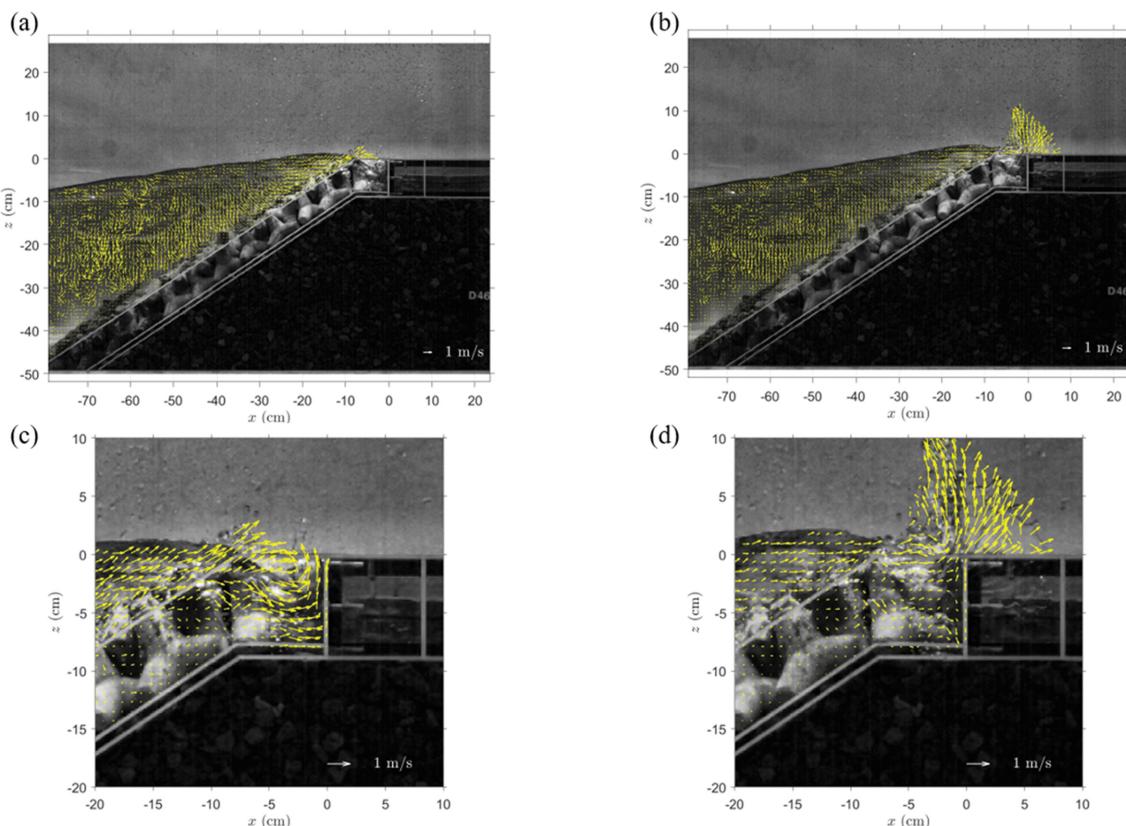


Fig. 9. Velocity fields for RW2 at (a, c) $t/T = 17.95$ and (b, d) $t/T = 17.98$. (c, d) Velocity vectors in the aerated region are shown in detail. Note that only one half of the vectors are plotted for brevity.

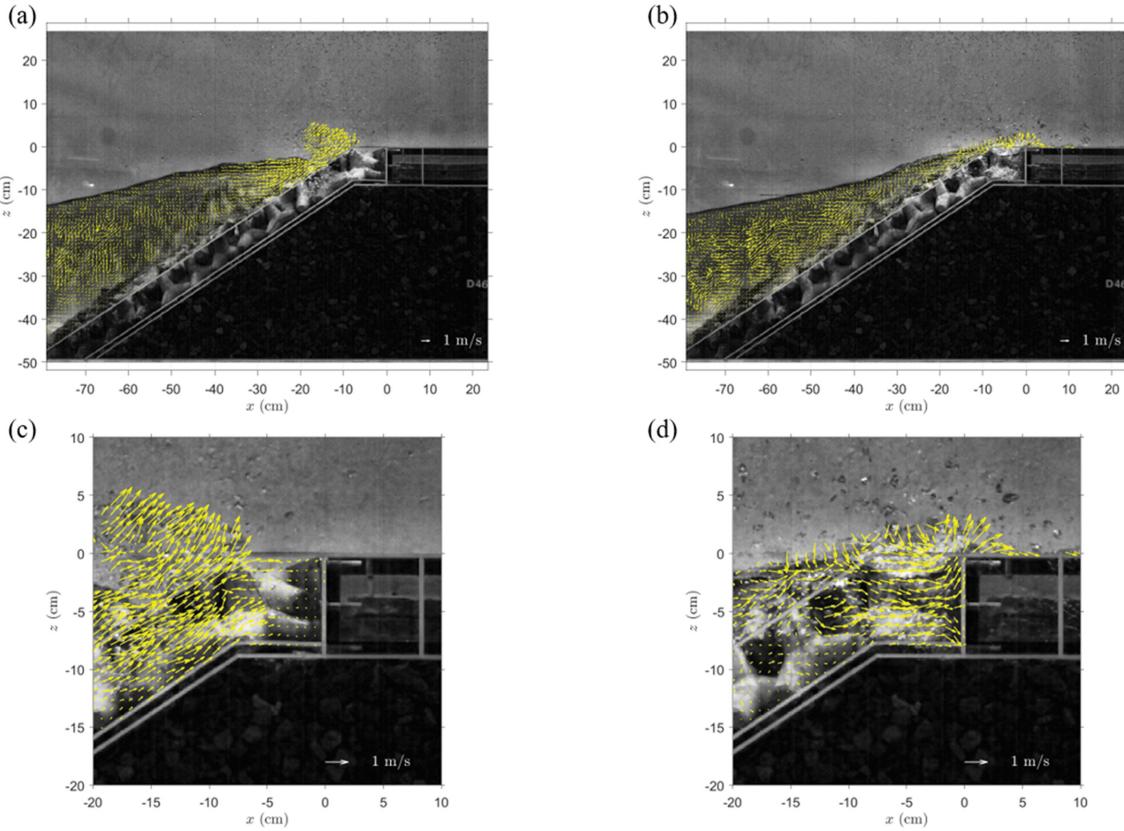


Fig. 10. Velocity fields for RW3 at (a, c) $t/T = 17.80$ and (b, d) $t/T = 17.94$. (c, d) Velocity vectors in the aerated region are shown in detail. Note that only one half of the vectors are plotted for brevity.

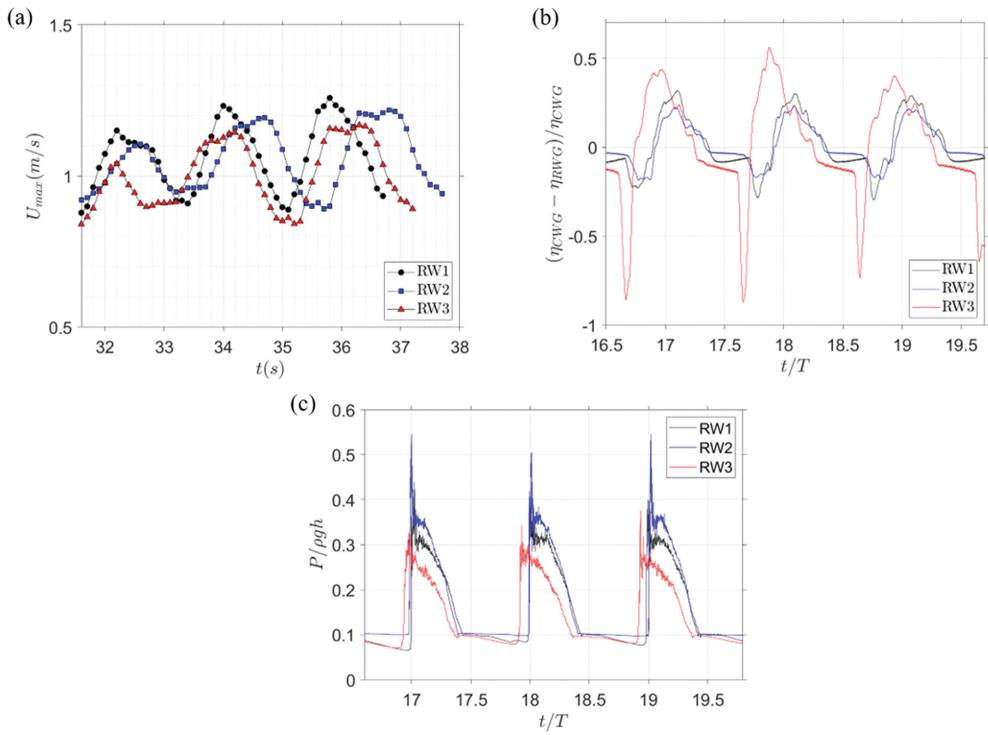


Fig. 11. Temporal variation of (a) maximum horizontal velocity, (b) void fraction, and (c) impact pressure.

충돌 후 쳐오르는 높이와 유속벡터의 연직성분 크기는 입사파의 주기가 작은 RW1에 비해 큰 것을 볼 수 있다. Fig. 10

에서는 RW3가 직립벽에의 충돌 이전에 이미 쇄파가 발생하고 앞으로 튀는 스플래쉬업이 명확히 나타나고 사면경사와 평

행한 방향으로 진행하는 양상을 보여준다(Fig. 10c). Fig. 10d는 충돌과정에서 위로 쳐오르는 부분과 천단부로 하강하는 두 가지의 주된 운동량을 보여주고 있다.

Fig. 11a는 실험케이스별로 시간에 따른 최대수평유속 U_{max} 의 분포를 나타낸 것으로서 쇄파 형태에 따른 시간별 최대 수평유속의 첨두값들에 큰 차이가 없었다. 단, 최대수평유속을 각각의 파속으로 무차원화했을 때 해당 값들은 각각 파속의 약 0.25~0.55배로 감소하였다. Ryu and Lee(2007)에 따르면 사석 마운드가 없이 직립 구조물에 파 내습 전후의 최대수평유속은 파속 C 의 1.5배였다. 따라서, 본 연구에서 사용된 사석층과 테트라포드 피복층으로 인해 상당한 파랑 감쇄효과가 나타났다고 판단된다. Fig. 11b에서 시간동기화된 사면 중간 지점에서의 평균기포분율을 보면 RW3의 경우에 첨두값들이 가장 높게 나타나고 RW2의 경우 가장 작지만, RW1과 RW2는 큰 차이가 없는 형태를 볼 수 있다.

Fig. 11c는 해당 시간에서 직립벽 최상단에 설치된 파압계로 계측된 파압 시계열을 무차원화시켜 나타내었다. 조파 초기의 불안정성과 반사파에 의한 영향을 최소화하기 위해 구조물에 도달한 3, 4, 5번째 규칙파를 도시하였다. 주기를 달리한 3개의 규칙파 중 주기가 가장 긴 2.2 s의 RW2에서 가장 큰 파압이 계측되었고, 파압이 증폭할 때 기울기가 가장 큰 것으로 나타났다. 발달된 쇄파가 직립벽에 충돌하는 RW3는 파압의 증가폭이 작았고, 다량이 공기유입이 수반된 전복-통과(Flip-through) 형태의 RW1는 파압의 증가폭이 늘어났지만 RW2의 경우에 비해서 작았다. 이는 사석으로 피복된 본 실험의 결과가 경사식 마운드가 없는 직립벽에서 얻어진 이전의 결과들과 큰 차이가 없다는 사실을 보여준다. 다위상유체의 운동량은 혼합밀도와 유속에 비례하고 충돌 시 쇄파와 직립벽간의 충돌 형태에 따른 실험파 수평유속 첨두값들에 큰 차이가 없었지만 기포분율과 파압의 첨두값들에는 분명한 차이가 나타났기 때문에 이는 충격파압 산정에 있어서 기포분율이 중요한 인자라고 판단할 수 있는 근거가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 테트라포드로 피복된 경사식 마운드 위의 직립벽에 작용하는 충격파압을 쇄파 형태에 따라 구분하기 위해 파고가 같고 주기가 다른 규칙파를 생성하고 충돌 직전의 유속장과 기포분율을 측정하였다. 쇄파의 유속장 측정을 위해 BIV 기법을 사용하였고 기포분율의 측정을 위해 간단한 복합파고계 기법을 사용하였다.

입사파의 주기에 따라 충돌 직전 쇄파의 형태가 다르게 관측되었고, 주기가 짧을수록 사면을 따라 진행하면서 쇄파가 빨리 발생하여 기포분율이 큰 상태로 직립벽과 충돌한 반면에 주기가 큰 입사파의 경우 기포유입이 거의 없는 전복-통과(Flip-through) 충돌이 발생하였다. 입사파 주기 1.4 s, 1.8 s, 2.2 s의 경우에 사면경사의 중간지점에서 수심평균공극률은 각

각 0.49, 0.29, 0.05로 감소하였다.

측정된 입사파의 주기가 짧을수록 최대수평유속은 파속에 비해 큰 증가율을 보였고 피복층으로 인한 파랑감쇄로 인해 최대수평유속은 각각 파속의 약 0.25~0.55배로 감소하였다. 계측된 파압은 입사파의 주기가 클수록 급격한 증가폭을 보였고, 따라서 충돌 직전 운동량 산정에 기포분율이 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

다만, 본 연구결과는 실험케이스가 적어 회귀를 통한 경험식을 도출하기 어려운 점이 있고 쇄파 형상을 분류하기 위해 규칙파에 한정되어 결과를 제시하였기 때문에 파랑의 군집과 반사파에 의해 발생하는 극단적인 월파의 경우를 분석할 수 없었다. 또한, 순간적인 파압의 변동성을 고려하여 반복실험을 통해 쇄파의 양상을 평균 유속장과 충격파압의 시간적분과의 관계를 유추하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 “재해안전 항만 구축 기술개발(PM62370)” 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 실험을 도와준 장세철, 이주연, 권창현 씨에게 감사합니다.

References

- Bullock, G.N., Obhrai, C., Peregrine, D.H. and Bredmose, H. (2007). Violent breaking wave impacts. Part 1: results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coastal Engineering*, 54, 602-617.
- Chuang, W., Chang, K. and Mercier, R. (2015). Green water velocity due to breaking wave impingement on a tension leg platform. *Exp. Fluids*, 56(7), 1-21.
- Cooker, M.J. and Peregrine, D.H. (1991). Wave breaking and wave impact pressures. In: *Developments in Coastal Engineering*, Univ. of Bristol, 47-64.
- Cox, D.T. and Shin, S.W. (2003). Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves. *J. Eng. Mech.*, 129(10), 1197-1205.
- Deane, G.B. and Stokes, M.D. (2002). Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, 418(6900), 839-844.
- Hattori, M., Arami, A. and Yui, T. (1994). Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types. *Coastal Engineering*, 22(1-2), 79-114.
- Ko, H.S., Lee, J.Y., Jang, S.C. and Oh, S.H. (2022). Experimental investigation of wave force on the pavement behind crown wall of rubble mound seawall. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(1), 19-25 (in Korean).
- Lin, C., Hsieh, S.-C., Lin, I.-J., Chang, K. and Raikar, R.V. (2012). Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps. *Exp. Fluids*, 53(5), 1591-1616.

- Lugni, C., Brocchini, M. and Faltinsen, O. (2006). Wave impact loads: the role of the flipthrough. *Phys. Fluids*, 18, 122101-122118.
- Na, B., Chang, K.-A., Huang, Z.-C. and Lim, H.-J. (2016). Turbulent flow field and air entrainment in laboratory plunging breaking waves. *J. Geophys. Res.* 121(5), 2980-3009.
- Na, B., Chang, K. and Lim, H. (2020). Flow kinematics and air entrainment under laboratory spilling breaking waves. *J. Fluid Mech.*, 882, A15.
- Na, B. and Son, S. (2021). Void fraction estimation using a simple combined wave gauge system under breaking waves. *Ocean Engineering*, 241, 110059.
- Pedrozo-Acuna, A., de Alegria-Arzaburu, A.R., Torres-Freyermuth, A., Mendoza, E. and Silva, R. (2011). Laboratory investigation of pressure gradients induced by plunging breakers. *Coastal Engineering*, 58(8), 722-738.
- Rojas, G. and Loewen, M. R. (2010). Void fraction measurements beneath plunging and spilling breaking waves. *J. Geophys. Res.*, 115, C08001.
- Ryu, Y., Chang, K.-A. and Lim, H.-J. (2005). Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Meas. Sci. Tech.*, 16, 1945-1953.
- Ryu, Y. and Lee, J.Y. (2008). Experimental study of overtopping void ratio by wave breaking. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(2), 157-167 (in Korean).
- Ryu, Y., Lee, J.Y. and Kim, Y. (2007). Runup and overtopping velocity due to wave breaking. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(6), 606-613 (in Korean).
- Song, Y., Chang, K.-A., Ryu, Y. and Kwon, S. (2013). Experimental study on flow kinematics and impact pressure in liquid sloshing. *Exp. Fluids*, 54(9), 1-20.

Received 5 August, 2022

Revised 25 August, 2022

Accepted 25 August, 2022