

규칙파 조건에서의 사질해안 폭풍파와 정상파 단면변화 실험연구

최준우* · 노 민**

Choi, Junwoo*, Roh, Min**

An Experimental Study of Sand Beach Profile Evolution under Regular Waves Corresponding to Storm and Normal Conditions

ABSTRACT

In order to understand the mechanism of the cross-shore evolution of storm (barred) and normal (nonbarred) profiles of a sandy beach, the vertically two-dimensional laboratory experiment was performed with a movable bed. The beach profiles and free surface motion were measured under monochromatic wave conditions evolving the storm and normal beach profiles. The observation was conducted in the surf zone during the alternation of the two wave conditions to reach its quasi-equilibrium state. The sandbar-crest and trough and the steep berm were evolved due to the plunging breakers in the storm case, and the bar-trough was decayed due to the spilling breakers in the normal case. From the measurements, it was found that the storm wave case was in an erosion state and the normal wave case was in an accretion state. The strong undertow, which is a dominant factor of the offshore migration mechanism, was developed in the storm wave case, and the weak undertow was developed in the normal wave case. The skewness and the asymmetry of the nonlinear wave motion, which is a dominant factor of the onshore migration mechanism, was measured similarly in both cases.

Key words : Laboratory movable-bed experiment, Beach profile evolution, Surfzone, Undertow, Skewness, Asymmetry

초 록

사질해안의 폭풍 및 정상파 단면사이의 지형변화 특성을 이해하기 위해 2차원 이동상 수리실험을 수행하였다. 폭풍 및 정상파 단면을 발달시키는 입사파 파라미터를 조건으로, 연속적으로 단면 지형변화와 수면변위를 측정하였다. 두 입사파 조건을 번갈아 각각의 평형 상태에 도달하기까지의 변화를 쇄파대에서 관측하였다. 폭풍파 조건에서 붕괴(plunging) 쇄파로 사주가 발달하고 포말대의 경사가 급해짐을 보였으며, 정상파 조건에서는 말림(spilling) 쇄파에 의해 사주가 소멸함을 보였다. 단면 지형변화 관측을 통하여 폭풍파 조건에서 표사가 외해로 유출되고, 정상파 조건에서 내해로 표사가 유입됨을 알 수 있었다. 폭풍파 조건에서 외해방향으로의 표사이송에 지배적인 역할을 하는 강한 역저류(undertow)가 발달하였고, 정상파 조건에서는 약한 역저류가 발달하였다. 그리고 두 조건에서 모두 해안방향으로의 표사이송에 지배적 역할을 하는 비선형 파동에 의한 왜도(skewness)와 비대칭성(asymmetry)이 관측되었다.

검색어 : 이동상 수리실험, 해안단면 변화, 쇄파대, 역저류, 왜도, 비대칭성

1. 서론

최근 지구 온난화에 의한 해수면 상승과 초대형 태풍, 폭풍해일의 잦은 내습으로 연안침식이 가속화되고 있어, 연안침식은 매우 심각한 자연재해로 인식되고 있다(Martinez et al., 2007; Cazenave et al., 2008).

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jwchoi@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 신진연구원, 공학박사 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · rohmin@kict.re.kr)

Received January 14, 2016/ revised April 18, 2016/ accepted January 17, 2017

연안침식의 원인을 연구하기 위한 이동상 수리실험은 많은 시간과 비용이 소요되고, 축척 효과에 따른 한계로 인해 다양한 계측이 어렵다. 축척 효과의 문제를 해결하기 위해 Kraus and Smith (1994) 및 Arcilla et al. (1994)를 시작으로 지속적으로 실험역 수준의 2차원 이동상 수리실험 연구가 수행되고 있다(Alsina et al., 2012; Williams et al., 2012; Yoon and Cox, 2010). 그러나 실험은 비용문제 때문에 몇 개 나라에서 제한적으로 수행되고 있어, 다양한 연구가 진행되기 어렵다. 반면에 Srisuwan et al. (2015), Berni et al. (2013), Grasso et al. (2009) 등 여전히 중소규모 이동상 실험을 통해 다양한 실험 연구가 수행되고 있으며, Baldock et al. (2011)은 실험이 중소규모의 실험 결과와 정성적으로 일치함을 보였다.

최근 단면지형 변화에 대한 연구는 현장관측, 실험, 수치모의를 통하여 Hoefel and Elgar (2003)가 제시하였던 사주의 외해와 해안방향으로의 이동 메커니즘을 연구하는 과정에 있다. 이 메커니즘은 쇄파에 의해 발달하는 역저류(undertow)에 의해 사주가 외해 방향으로 이동(offshore migration)하여 침식되고, 파랑에 의한 유속과 그 가속도의 왜도(skewness)에 기인하여 해안방향으로의 사주가 이동(onshore migration)하여 퇴적된다는 것이다. 이러한 이론은 Marino-Tapia et al. (2007a, b), Ruessink et al. (2007) 등에서 관측을 통해 발전되었고, Grasso et al. (2009), Berni et al. (2013) 등에서 실험을 통해 확인되었다. 이러한 결과를 바탕으로 Hsu et al. (2006), Fernandez-Mora et al. (2015) 등에서 수치모의를 개선하는 연구가 수행되었다. 그러나 아직 수리실험 연구를 통해 침식과 퇴적단면 조건에서 역저류와 파동유속 및 가속도의 왜도 결과를 제시하여 분석한 두 메커니즘의 상호작용에 대한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 입의 폭풍파와 평상파 단면을 재현하는 파라미터를 입사파 조건으로 사용하고, 일정 바닥경사 0.04를 초기 조건으로 하여 단면변화를 관측하는 이동상 수리실험을 수행하였다. 모형 표사는 $D_{50}=0.18$ mm를 사용하였고, 따라서 본 수리실험 체계는 $D_{50}=0.4$ mm인 표사로 구성된 입의 원형 사질해안에 대하여 표사 침강속도 기준의 Froude 상사에 따라 약 1/10 축소에 해당한다. 두 입사파 조건을 번갈아 각각의 평형 상태에 도달하기까지 시간에 따라 변동되는 지형단면과 수면변위를 관측한 결과를 이용하여 분석하였다. 이 결과분석을 통해 침식과 퇴적단면 조건에서 관측된 역저류 유속과 파동 유속 및 가속도 왜도 결과를 제시한다.

2. 수리모형

본 실험은 Fig. 1에 도시한 길이 48 m, 폭 1.0 m, 높이 2.0 m의 2차원 조파수로에서 수행하였다. 이동상 수리모형 실험체계를

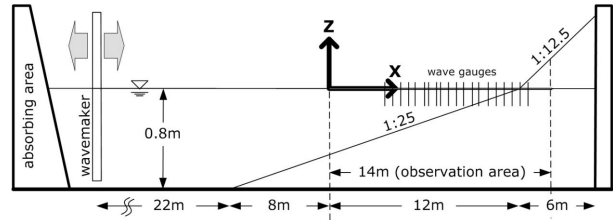


Fig. 1. Sketch of Experimental Set-up and Initial Beach Profile

구성하기 위해 $D_{50}=0.18$ mm의 표사를 실험사로 채택하였다. 이 표사의 입경은 여러 입경의 표사로 수리실험을 수행한 K m rcu et al. (2008)와 Srisuwan et al. (2015)의 논문에 기술된 가장 작은 표사입경과 그 크기가 같다. 초기 실험 경사는 수리실험 관측 쇄파대 거리를 고려하여 1 : 25로 구성하였다. 포말대는 일반적으로 쇄파대 보다 경사가 급하므로(Baldock et al., 2011), 정지 수면위의 영역을 일정 경사 1/12.5로 구성하였다.

Rouse (1937)에 따르면 선정된 실험사($D_{50}=0.18$ mm)의 침강 속도는 2 cm/s이다. 본 실험조건을 침강속도를 사용하는 Froude 상사를 기준으로 표본해안에 대하여 1/10의 축척으로 가정한다면, 원형인 표본해안 표사의 침강속도는 $6.3 (=2\sqrt{10})$ cm/s이다. 이 침강속도에 해당하는 표사는 근사적으로 $D_{50}=0.4$ mm이다. 따라서 본 실험조건은 $D_{50}=0.4$ mm를 표사로 갖는 사질해안에 대하여 Kriebel et al. (1986)의 왜곡되지 않은 Froude 모형을 만족하는 수리실험체계이다. 그러나 경계층 두께, 모래물결(ripple) 등의 모형과 원형에 차이에 대한 축척 효과가 존재하기 때문에 원형이 되는 표본해안에 대해 완전한 모형이라고 할 수 없음을 밝힌다. 그러나 정성적으로 메커니즘을 재현한다면 수치모의 결과의 검증자료로 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

앞서 기술한 축척에 따라 모형과 원형에 대한 입사파 조건과 파라미터를 Table 1에 정리하였다. 실험을 위해 입사파는 규칙파를 사용하였으며, 불규칙파의 쇄파대에 비해 영역이 좁고 쇄파 현상이 집중되어 있으므로 단면형상 변화를 집중해서 관측할 수 있다고 판단하였다. 이 부분은 다음절에 결과와 함께 다시 기술하였다.

Table 1. Wave Parameter of Experiment and Target Area

Parameter		Model	Prototype
Storm wave	wave height (H_0)	0.3 m	3 m
	wave period (T_0)	4 s	12.6 s
Normal wave	wave height (H_0)	0.1 m	1 m
	wave period (T_0)	2 s	6.3 s
Sediment (D_{50})		0.18 mm	0.4 mm
Sediment fall velocity (w_s)		2 cm/s	6.3 cm/s
Initial slope		0.04	0.04

선정된 입사파 파라미터가 각각 침식과 퇴적 단면을 형성하는 조건임을 확인하기 위해, 본 실험조건에 대하여 침식단면과 퇴적단면을 예측하는 무차원 단면형상 지수로 계산하여 Table 2에 제시하였다. Battjes (1974)가 정의한 쇄파지수(surf similarity parameter) (ξ)는 다음과 같다.

$$\xi = \tan\alpha / \sqrt{H_o/L_o} \quad (1)$$

여기서 α 는 해안 단면경사를 의미하며, L_o 는 심해 파장, H_o 는 심해 파고이다. 일반적으로 0.5를 기준으로 말림(spilling) 쇄파와 붕괴(plunging) 쇄파로 분류하며, 말림 쇄파인 경우에 퇴적조건으로, 붕괴 쇄파인 경우에 침식조건으로 보고 있다. 그러나 일정경사로부터 산정되므로 Wright and Short (1984)는 변화되는 지역적 특성(파고, 경사)을 포함한 수정 지수를 사용하였다. 또한, Yoon and Cox (2010)에서 밝힌 바와 같이 단순 쇄파지수의 수치만으로 쇄파를 나누거나 침식 또는 퇴적 경향을 결정하는 데는 한계가 있다. 본 실험의 두 입사파 조건은 모두 말림 쇄파 조건의 범위에 있다. 본 논문 후반에 쇄파대 계측결과를 통해 산정되는 Wright and Short (1984)의 수정 쇄파지수를 결과에 제시하고 비교한다. 침퇴적 단면을 평가하는 다른 지수인 Dean 수(number) Ω_D (Dean, 1973)는 다음과 같이 나타내며,

$$\Omega_D = H / Tw_s \quad (2)$$

여기서 w_s 는 표사침강속도이다. 일반적으로 $\Omega=4.0$ 을 기준으로 큰 경우를 폭풍(침식)단면으로, 작은 경우를 평상(퇴적)단면으로 구별한다. 본 실험조건의 Dean 수는 Wright and Short (1984)에서 제시하는 $1 < \Omega < 5$ 의 범위로 붕괴 및 말림 쇄파가 섞여 있는 조건이기도 하다. 참고로 Hattori and Kawamata (1980)는 쇄파시의 파고와 경사를 추가하여 사용하기도 하였다. 또 다른 침퇴적 단면 지수로 Dalymple (1992)과 Kraus and Mason (1993)가 제시한 단면 지수(profile parameter)는 다음과 같고,

$$P_s = gH^2 / Tw_s^3 \quad (3)$$

Table 2. Parameters of Beach Profile According to Wave Condition

Condition	Storm condition		Normal condition	
	Model	Prototype	Model	Prototype
Surf similarity parameter	0.36	0.36	0.32	0.32
Dean number	3.75	4	2.5	2.65
Profile parameter	27,600	32,700	6,130	7,210

여기서 g 는 중력가속도이다. 이 단면 지수는 규칙파의 경우에 10,400을 기준으로 폭풍(침식)단면과 평상(퇴적)단면으로 나뉜다. 이 기준에 따르면 30 cm의 파고를 갖는 실험조건은 폭풍과 단면을 만드는 침식조건에 해당하고, 10 cm의 파고를 갖는 실험조건은 평상과 단면을 만드는 퇴적조건에 해당함을 알 수 있다. 따라서 본 실험조건은 Dalymple (1992)의 단면 지수를 기준으로 폭풍침식조건과 평상퇴적조건으로 가정하고 실험을 수행하였고, 이를 다음 절에 실험관측을 통해 침퇴적 결과를 확인하였다. 또한, 쇄파대 파고와 단면경사를 이용하여 침퇴적 단면 지수를 산정하여 결과부분에 제시하고 검토하였다.

지형변동 및 수면변위 측정을 위한 실험 시간은 예비 실험을 통해 각 파랑 조건에 대해 지형변화가 평형화되는 시간으로 하였다. 폭풍과 조건의 경우 60분으로, 평상과 조건의 경우는 120분으로 선정하였다. 참고로, 실규모 단면변화 실험을 수행한 Baldock et al. (2010)은 150분 이후에서 단면의 변화가 거의 없었고, 60분 이후에는 표사이송에 의미있는 변화가 없었다고 밝히고 있다. 따라서 원형에 대해 약 1/10의 축척에 해당하는 본 실험에서 선정한 60분과 120분은 상대적으로 충분한 실험시간으로 판단된다. 지형변동 계측은 총 480분에 걸쳐 수행되었으며, 초기 직선경사 지형으로부터 120분 동안 평상과 조건에 대한 지형변동을 측정하고, 이어서 60분 동안 폭풍과 조건에 대한 지형변동을 측정하였다. 또 이어서 120분 동안의 평상과 조건, 60분 동안의 폭풍과 조건, 그리고 120분 동안의 평상과 조건으로 번갈아 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 두 가지 입사파 조건에 대해 반복 실험을 수행하여 평상과 단면과 폭풍과 단면사이의 변화과정을 집중하여 관찰하였다. 즉, 평상과 단면을 초기 조건으로 폭풍과 단면으로 변화는 과정과 폭풍과 단면으로부터 평상과 단면으로 변화하는 과정의 표사이동과 파랑 유동을 관찰하였다.

단면의 지형변화는 다음과 같이 계측하였다. 직선수로 측벽사이의 중앙과 양쪽 측벽으로부터 0.1 m 떨어진 횡축방향 위치에 대하여 바닥위치 탐지장치(bed profiler)로 수로를 따라 바닥위치를 계측하였다. 그리고 측정된 횡축방향 세 값을 평균하였다. 본 연구에서 사용된 기계식 자동 바닥위치 탐지장치는 수로상단 레일을 따라 일정속도로 이동하는 대차와 이와 연결된 바닥지형 위를 굴러 이동하는 직경 0.02 m 바퀴에 의해 구동된다. 이 탐지바퀴는 0.05 m의 회전(pivoting)팔에 부착되어 있고, 이 회전 팔은 수직상하로 움직이는 1.5 m의 원형관과 연결되어 있고, 이 원형관은 대차에 부착되어있다. 탐지바퀴의 상하 움직임을 감지하여 원형관이 수직으로 최대 1.0 m의 범위로 자동으로 움직이도록 되어있다. 기준위치로부터 일정속도로 움직이는 대차에 따라 탐지바퀴의 수직이동 변위가 기록되어 바닥위치가 측정된다. 수직변위에 대한 오차는 약 ± 5 mm이며, 관측 원자료에는 모래물결의 변위가 포함되어

있으나 오차범위와 큰 차이가 없으므로 무시하였다. 본 연구의 지형을 측정하는 장치는 Baldock et al. (2011)에서 기술하고 있는 장치에 비해 소규모이나 유사하게 기능한다. Fig. 1에 나타난 것처럼 수직방향 원점은 정수면으로 하였고, 수평방향 원점은 조파기로부터 30 m, 이동상 모형 끝단으로부터 8m의 위치로 설정하였다. 선정된 입사파 조건에서 쇄파의 영향으로 변화하는 지형과 수면변위를 측정하기 위해 포말대를 일부 포함한 14 m 구간에 대해 관측을 수행하였다. 지형변동이 급변하는 폭풍 조건에서는 3분 주기로, 지형변동이 상대적으로 완만한 평상 조건에서는 6분 주기로 지형변동을 측정하였다. 지형변동 측정을 위해 조파를 중단하고 재조파하는 과정에서의 지형변동은 미세하였으며, 그 변화량은 상대적으로 무시할 만한 것으로 가정하였다(Baldock et al., 2010). 파고분석을 위한 수면변위 계측은 kenek사의 용량식 파고계를 사용하였으며 그 위치는 Fig. 1의 좌표축을 기준으로 $x=[3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.4, 6.0, 6.25, 6.75, 7.0, 7.5, 8.0, 8.44, 9.0, 9.43, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5]$ (m)이다.

3. 수리실험 결과

수리실험을 통해 시간에 따라 변화하는 지형단면을 관측하였고, 동시에 지형변화의 원인이 되는 파랑의 변형을 관측하였다. 수리실험 결과를 기술하는 본 절에서는 첫째로 관측된 단면지형을 제시하고 관측된 단면지형 변동으로부터 산정되는 표사 이동량을 계산하여 제시하였다. 두 번째로, 변동하는 지형단면 위에서 변형하는 파랑을 분석하여 제시하였다. 세 번째로 관측된 파고분포를 이용하여 역저류(undertow)를 계산하고, 수면변위 파형을 이용하여 비선형 파우동의 왜도(skewness)와 비대칭성(asymmetry)을 계산하고 분석하여 제시하였다.

3.1 단면지형 변동

평상파 조건과 폭풍파 조건을 번갈아 입사시켜 480분 동안 측정된 지형변동 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 초기 직선경사 조건에서부터 입사파 조건에 따라 폭풍단면의 특징인 사주(sandbar)의 생성(약 $x=5$ m와 $x=7$ m)과 침식단면의 특징인 사주의 소멸이 반복해서 나타남을 보여준다. 또한 해안선($x=12$ m) 근처에서의 포말대 경사가 점차 급해짐을 알 수 있다.

평상단면과 폭풍단면 사이의 자세한 지형변동을 제시하기 위해 Fig. 3(a)에 폭풍파 조건에서 120-180분의 기간 동안에 측정된 지형자료를 나타내었고, Fig. 3(b)에 평상파 조건에서 180-300분의 기간 동안에 측정된 지형자료를 나타내었다. 폭풍파 조건의 60분 동안의 변화기운에 약 12분 동안의 변화를 통해 사주의 마루(crest)와 골(trough)이 형성되어 평형화되고, 포말대의 지형은 지속적인

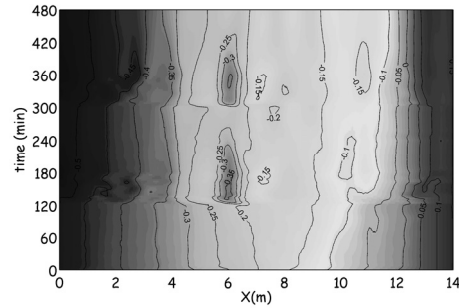


Fig. 2. Beach Profile Evolution under the Storm Wave Condition (120-180 min, 300-360 min) and Normal Wave Condition (0-120 min, 180-300 min, 360-480 min) (The Contour Lines Indicates the Water Depth [m])

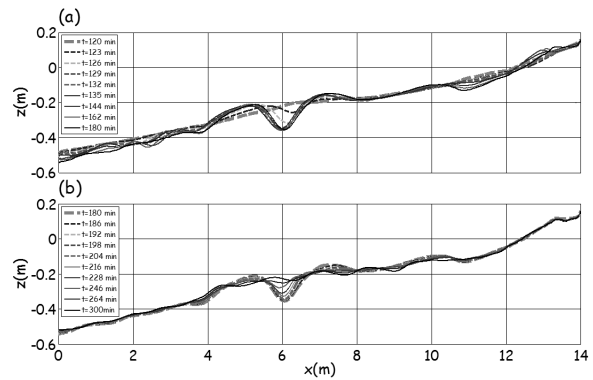


Fig. 3. Beach Profile Evolution under (a) The Storm Wave Condition (120-180 min) and (b) Normal Wave Condition (180-300 min)

로 변화한 것을 알 수 있다. 평상파 조건의 120분 동안에는 폭풍파에 의해 생성되어 있던 사주의 마루와 골이 서서히 소멸된 것을 알 수 있으며, 그 외 영역에서의 변화량은 상대적으로 작아 보인다.

반복된 폭풍파와 평상파 조건에 따른 침식과 퇴적에 따른 표사이동량을 검토하기 위해 다음과 같은 누적 표사 이동량 Q (Baldock et al., 2011)을 사용하였다.

$$Q(x_i) = Q(x_{i-1}) + \int_{x_{i-1}}^{x_i} M \frac{\Delta z_b}{\Delta t} dx \quad (4)$$

여기서 x_i 는 측정위치를 나타내고, Δt 는 각 조건에서의 측정 시간이며, Δz_b 는 각 조건에서의 지형 변형량이다. M 은 실험사의 토사율(solid fraction)로 0.6을 사용하였다. 지형이 변동되지 않는 위치($x=14$ m)를 시작점으로 조파방향으로 표사이동량을 계산하여, Fig. 4에 나타내었다. 폭풍파 조건($t=180$ min와 $t=360$ min)의 누적 표사이동량을 보면 관측 구간에서 표사가 외해로 유출되어 침식되고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 폭풍파 조건에 비해 두 번째 폭풍파 조건에서의 침식량이 줄어들고 포말대 영역에서는

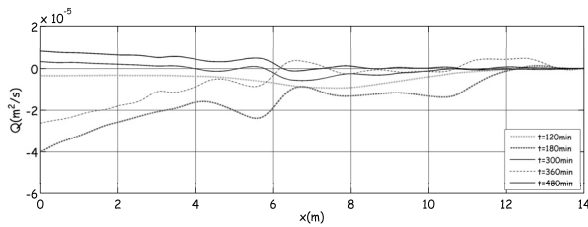


Fig. 4. Net Sediment Transport Rate along the Distance under the Storm Wave Case ($t=180$ min, $t=360$ min) and the Normal Wave Case ($t=120$ min, $t=300$ min, $t=480$ min)

퇴적량도 발생하는 것을 알 수 있다. 초기 일정경사로부터 시작된 첫 번째 평상파 조건($t=120$ min)에서는 침식되고 있으나, 폭풍파에 의해 변형된 지형에서의 평상파 조건($t=300$ min과 $t=480$ min)에서는 표사가 유입되어 퇴적됨을 알 수 있다. 결과적으로 본 실험의 관측구간에 대해 폭풍파 조건은 침식을 발생시키는 조건이며 평상파 조건은 퇴적을 발생시키는 조건임을 확인할 수 있었다.

3.2 변동지형에서의 파랑변형

폭풍파와 평상파가 각각 지형을 변화시키는 조건에서 계측된 수면변위의 에너지 밀도 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 스펙트럼으로부터 입사된 규칙파의 주기에 해당하는 주파수 0.25 Hz (폭풍파)와 0.5 Hz (평상파)에서 각각 최대값이 나타나고, 입사 주파수에 대한 조화(harmonic) 주파수들에서 에너지가 큰 것을 알 수 있다. 쇄파대 안쪽에서 비선형 파형이 해안선 방향으로 기울어진 툰모양이 되면서 조화(harmonic)들의 에너지가 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 제시된 스펙트럼으로부터 입사 주파수보다 긴 주기를 갖는 파의 주파수에서 유의미한 에너지 증폭이 없음을 알 수 있다. 이로부터 쇄파위치의 변화에 의해 발생하는 즉, 일반적으로 근교효과에 의해 발생하는 외중력파(infragravity wave) (또는 surfbeat)

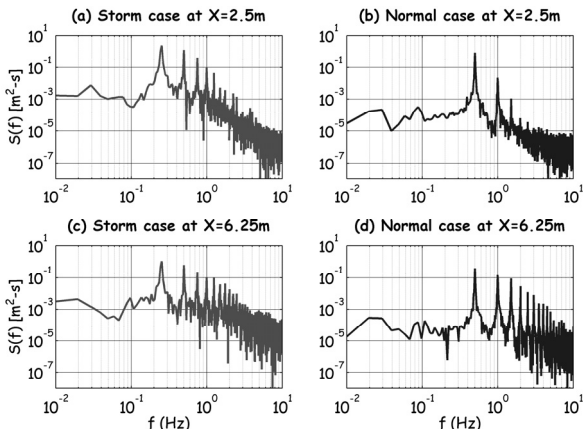


Fig. 5. Power Spectral Density of Surface Displacements Measured at $X=2.5$ m (Outside Surfzone) and $X=6.25$ m (Inside Surfzone) of the Storm Wave Case and the Normal Wave Case

(Schäffer, 1993; Baldock and Huntley, 2002)와 실험수로 부진동에 의해 발생할 수 있는 장파(Kirby et al., 2006)가 실험에 영향을 주고 있지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6에 폭풍파 단면을 만드는 조건의 $t=120-180$ min 동안에 계측한 파고를 나타내었다. 시간에 따른 변화를 제시하기 위해, 60분 동안의 계측 초기 6분과 계측 후기 6분 자료, 그리고 전체 60분 자료를 이용하여 산정된 파고를 각각 나타내었다. 파고는 영점상향교차법(zero-up crossing method)을 사용한 평균파고이다. 추가로 앞서 제시하였던 시간에 따른 지형변화를 함께 도시하였다. 폭풍파 조건의 쇄파는 붕괴 쇄파 특성을 나타내었으며 약 4.5 m의 쇄파 시작점으로부터 급격한 파고의 감소를 보이고 있다. 급격한 파고감소가 약 $x=6$ m까지 나타나고 그 후에도 수심의 감소에 따른 연속된 쇄파로 파고가 감소함을 알 수 있다. 첫 번째의 강한 쇄파로 약 $x=5-7$ m위치에 시주의 마루와 골이 생성되었음을 알 수 있다. 전체평균 분포와 마지막 6분 평균 분포가 거의 일치한다는 것과 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 30분이 지난 후 지형은 시간에 따라 상대적으로 큰 변동이 없음을 알 수 있다. 이에 따른 파고변화도 크게 변화되지 않은 것으로 보인다. 결과적으로 폭풍파 조건의 실험은 60분이후로 준 평형 상태의 폭풍파 단면에 도달했다고 판단할 수 있었다.

규칙파 조건으로 실험을 하여 비교적 좁은 쇄파대와 급격한 쇄파에 따른 지형변동을 관찰할 수 있었으나, 반사파의 발생에 따라 위상의 상호작용으로 부분 중복파가 발생하고 그 영향이 파고분포에 포함되어 계측되었음을 밝힌다(Wang and Kraus, 2005; Choi et al., 2015). 불규칙파의 경우에도 여러 주기의 무작위 위상 상호작용에 따라 명확히 드러나지는 않지만, 특히 좁은 스펙트럼을 갖는 너울이 지배적인 경우에 반사파의 영향이 포함되어 있을 것으로 판단된다. 또한, 이러한 반사파에 따른 상호작용은

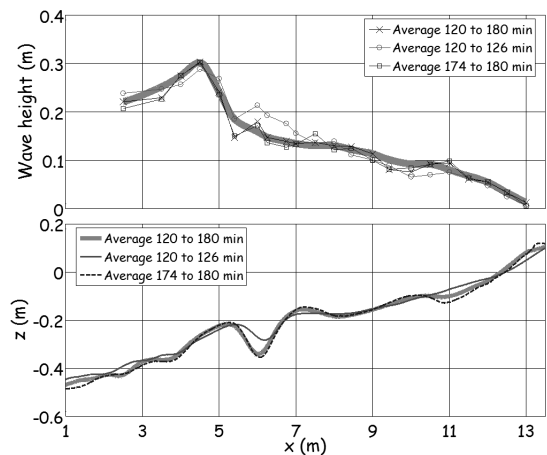


Fig. 6. Distributions of Wave Height (First Panel) and Beach Profiles (Second Panel) under the First Storm Wave Condition

파형을 변화시켜 유속과 가속도의 왜도에도 영향을 줄 것으로 판단된다(Liu and Tajima, 2014). 참고로 Fig. 6에 회색선으로 나타낸 파고분포는 이러한 중복과 위상 영향이 없는 경우에 대한 추세를 추정하여 스케치한 것이다. 강한 쇄파의 붕괴 효과로 표사가 급격히 부유하고, Hoefel and Elgar (2003)의 비선형 파유동 왜도에 따른 해안방향 표사이송과 역저류에 의한 외해방향 표사이송 메커니즘이 서로 상호작용하여 지형변동이 일어나는 것으로 보인다. 또한, 변화된 지형 위로 주기적 운동에 따른 표사이송도 영향이 있을 것으로 추정된다. Hoefel and Elgar (2003)의 메커니즘을 확인하기 위해 관측된 수면변위로 파유동을 계산하여 다음에서 분석하였다.

총 60분 (t=120-180 min)동안 폭풍파 단면으로 변형된 지형을 초기조건으로 하여, 평상파 조건을 120분 동안 입사(t=180-300 min)하였다. 평상파 단면으로 변형되는 지형과 그에 따라 변형하는 파고를 동시에 관측하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞에 제시한 경우와 같은 방법으로 120분(t=180-300 min)동안의 계속 초기 6분과 계속 후기 6분 자료, 그리고 전체 120분 자료를 이용하여 계산된 파고를 각각 나타내었다. 평상파 조건의 쇄파는 말뚝 쇄파의 특징을 나타내었으며 폭풍파 실험보다 상대적으로 완만한 파고의 감소를 보이고 있다. 앞에서도 언급한 것처럼, 규칙파를 사용함에 따라 반사파에 의한 위상의 상호작용으로 부분 중복파가 발생하고 그 영향이 파고분포에 계측되었다(Wang and Kraus, 2005; Choi et al., 2015). 관측에 따르면 약 x=6~7 m위치에서 쇄파가 시작되었으며, 파고가 점차적으로 감소하고 있어, 수심 감소에 따라 연속적으로 쇄파가 발생함을 알 수 있다. 앞서 언급한 Hoefel and Elgar (2003)의 외해 및 해안방향 표사이송 메커니즘이 폭풍 단면위에서 상호작용하여 사주의 골과 앞뒤의 마루가 소멸되어 평상 단면의 상태에 도달한 것으로 보인다. 또한, 앞서 언급한바와 같이 부분 중복파는 파형을 변화시켜 유속과 가속도의 왜도에도 영향을 줄

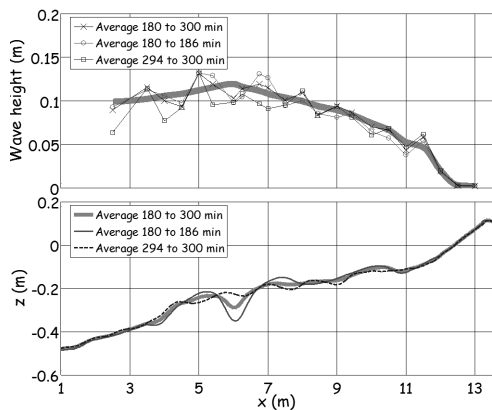


Fig. 7. Distributions of Wave Height (First Panel) and Beach Profiles (Second Panel) under the Second Normal Wave Condition

것으로 예상된다(Liu and Tajima, 2014). Fig. 7에 회색선으로 나타낸 파고분포는 이러한 중복과 위상 영향이 없는 경우에 대한 추세를 추정하여 스케치한 것이다.

Fig. 8은 앞서 제시하였던 폭풍침식 및 평상퇴적 단면 평가 지수를 도식한 것으로, 각각의 지수는 본 실험에서 측정된 쇄파 파고와 쇄파위치에서의 경사를 이용하여 산정하였다. 폭풍 및 평상 입사파 조건에 대해 시간에 따라 변화하는 각각의 지수가 나타났었다. 시간은 전체 관측시간을 유사 평형단면 도달시간으로 가정하여, 각 조건의 실험진행 시간을 총 관측시간으로 무차원화하여 나타내었다. 첫 번째 패널에는 쇄파 파고 및 쇄파위치의 경사를 이용한 쇄파지수(Ω_b)를, 두 번째 패널에는 쇄파 파고를 이용한 Dean 수 (Ω_D)를, 세 번째 패널에는 Hattori and Kawamata (1980)가 사용한 쇄파 파고와 경사를 이용한 Dean 수(Ω_{HK})를, 네 번째 패널에는 쇄파 파고를 이용한 단면 지수(P_s)를 나타내었다.

쇄파 위치의 경사를 사용한 수정 쇄파지수와 수정 Dean 수의 경우, 변형 전 초기에는 침퇴적 구별이 힘든 값을 나타내었으나, 시간변화에 따라 폭풍파 조건은 침식단면을 평상파 조건은 퇴적단면을 나타내는 값으로 구별되어 변화됨을 알 수 있다. 반면에, 쇄파 위치의 경사를 포함하지 않은 Dean 수와 단면 지수는 초기에 폭풍침식 단면과 평상퇴적 단면을 나타내는 값으로 구별되어 나타났고, 시간에 따라 큰 변화가 없었다. 따라서 최종 실험단면에 대해서는 수정 쇄파지수, 수정 Dean 수, 그리고 Dalrymple (1992)

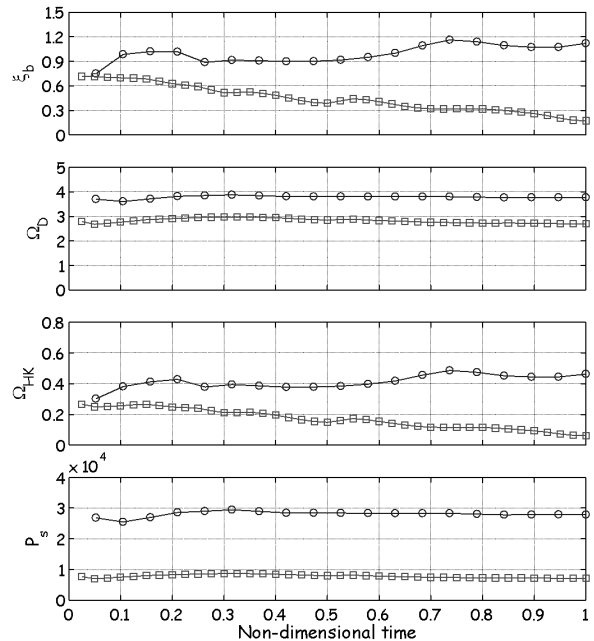


Fig. 8. Parameters of Beach Profile Evaluated According to the Storm Wave Condition (Circles) and the Normal Wave Condition (Squares) with the Local Breaking Wave Heights and Bottom Slopes

의 단면 지수가 본 실험의 침퇴적 결과와 일치함을 알 수 있다. 각 지수마다 외해의 입사파 조건을 적용해야 하는 경우와 변형된 상태의 쇄파대 내의 재원을 적용해야 되는 경우가 있는 것으로 보인다(Dalrymple, 1992). 본 연구의 결과에서는 Dean 수와 Dalrymple 단면 지수가 외해조건 및 쇄파대 조건을 사용한 값에 대해 일관성이 있는 것으로 보이며, Dalrymple 단면 지수가 외해조건 및 초기 쇄파대 조건을 이용하여 폭풍 단면과 평상 단면을 예측할 수 있다는 것을 확인하였다.

3.3 변동지형에서의 유동분석

계측된 수면변위를 이용하여 역저류 평균유속을 산정하고, 파랑에 의한 유속의 왜도 및 비대칭성을 추정하여 표사이동 원인에 대한 분석(Grasso et al., 2009)을 수행하였다. 먼저 역저류를 산정하기 위해 다음과 같이 파에너지 유동(flux)방정식과 수심적분된 연속방정식을 사용하였다. 파에너지 유동방정식은 에너지 소멸이 없다는 가정으로 천수화되는 파고를 예측하는 데 사용된다. 또한 바닥마찰과 쇄파에 따른 에너지 소멸을 각각의 모형을 통해 산정할 수 있는 경우에는 쇄파대 안에서의 파고도 예측할 수 있다. 기존 연구들에서 지형에 의해 변형되는 파랑을 해석하기 위해 파에너지 유동방정식 모형(Battjes and Janssen, 1978; Thornton and Guza, 1983; Ruessink et al., 2003)이 사용되어 왔다. 본 실험연구의 경우에는 파고가 계측되었으므로 파에너지 유동방정식으로부터 에너지 손실을 산정할 수 있다. 파에너지 유동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = -(D_{br} + D_{fr}) \quad (5)$$

여기서 E 는 파에너지, C_g 는 군파속도, D_{br} 은 쇄파에 의한 에너지 손실, D_{fr} 은 바닥마찰에 의한 에너지 손실이며, 파에너지(E)는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (6)$$

여기서 ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 파고를 나타낸다. 일반적으로 쇄파대에서 바닥마찰에 의한 에너지 손실은 쇄파에 의한 에너지 손실에 비해 작으므로 무시할 수 있다고 가정된다. 선형파 이론에 기초하여 이 방정식을 천수화 영역과 쇄파대 영역에 적용하였다. 역저류 유속은 시간평균 및 수심 적분된 연속방정식으로부터 유추할 수 있다(Dally and Brown, 1995; Cienfuegos et al., 2010). 다음은 정상상태와 연안방향으로 변화하지 않다는 가정으로 도출한 연속방정식이다.

$$\frac{d}{dx} \{U(h + \bar{\eta})\} + \frac{dQ_w}{dx} + \frac{dQ_r}{dx} = 0 \quad (7)$$

여기서 U 는 파곡이하의 수심평균 유속 (즉, 역저류의 유속), h 는 수심, $\bar{\eta}$ 는 평균수면, Q_w 는 파랑유도 유동(즉, wave-induced volume flux), Q_r 은 수면 롤러(roller) 효과에 의한 유동(즉, volume flux due to the surface roller effect)을 나타낸다. 수면 롤러는 수면이 말려들어감에 에너지 손실이 발생하는 강한 난류영역이며, 수면 롤러 효과에 의해 파랑유도 유동이 변화한다. 파랑유도 유동은 선형파 이론에 의해 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_w = \frac{1}{8} \frac{gH^2}{C} \quad (8)$$

여기서 C 는 파속이고, 수면 롤러 효과에 의한 유동은 Svendsen (1984a, b)에서 제시한 추정법을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_r = 2 \frac{E_r T}{\rho L} \quad (9)$$

여기서 E_r 은 수면 롤러 에너지이고, T 는 파주기, L 은 파장이며, 수면 롤러 에너지는 다음과 같이 산정된다.

$$E_r = \frac{\rho A_r L}{2T^2} \quad (10)$$

여기서 A_r 은 수면 롤러의 단면 면적이다. 본 연구에서는 이 수면 롤러 면적을 구하기 위해 다음과 같은 수면 롤러 에너지 유동 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \{E_r C\} = \alpha_r D_{br} - \frac{\rho g A_r K_r}{2T} \quad (11)$$

여기서 α_r 은 에너지 변환 계수(Tajima and Madsen, 2003)로 수면 롤러의 비정상 에너지 유동 효과(Stive and de Vriend, 1994) 및 수면 롤러 유체이동 속도의 효과(Lippmann et al., 1996)를 내포하고 있으며, K_r 은 수면파와 롤러사이의 마찰에 의해 발생하는 에너지 소멸효과(Lippmann et al., 1996)를 나타낸다. 참고로, Eq. (11)에 나타난 수면 롤러 에너지 유동 방정식은 Goda (2006), Reniers and Battjes (1997), 그리고 Tajima and Madsen (2003)에서 사용한 방정식과 동일한 식이다. 본 연구에서는 Eq. (5)를 이용하여 에너지 손실을 산정하고, $\alpha_r=0.1$, $K_r=0.08$ 을 Eq. (11)에 대입하

여 A_r 과 E_r 을 산정하므로 최종적으로 파곡이하의 수심평균 유속, 즉 역저류 유속을 추정할 수 있었다. 참고로, α_r 과 K_r 값은 Reniers and Battjes (1997)의 실험을 수치모의한 Choi et al. (2012)의 결과를 참고하여 선정된 것이다.

앞서 언급한 것처럼, 해안선 직각방향의 단면지형 변동은 파유동의 왜도 및 비대칭성에 의한 해안방향 표사이동과 역저류에 의한 외해방향 표사이동의 균형으로 결정되어 지는 것으로 알려져 있다 (Hoefel and Elgar, 2003). 천수가정으로 수면의 파동은 유체의 파동과 비례한다고 가정할 수 있으므로 본 연구에서는 수면변위를 이용하여 왜도와 비대칭성을 산정하였다. 비록 Michallet et al. (2011)은 수면파동의 왜도와 수심방향 위치에 지배를 받는 유체 파동 왜도의 차이를 언급하였으나, Berni et al. (2013)은 여전히 두 파동의 왜도는 선형비례 관계가 있다고 밝히고 있다. 상대적으로 좁은 파봉과 평평한 파곡을 갖는 비선형 파형의 툽날형상의 비대칭성 정도를 평가하기 위해서 왜도와 비대칭성을 사용한다(Elgar, 1987; Henderson et al., 2004). 파동의 왜도, S_η^k 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_\eta^k = \frac{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^3 \rangle}{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^2 \rangle^{3/2}} \quad (12)$$

여기서 η 는 수면변위 시계열이고, $\langle () \rangle$ 는 시계열 평균이다. 파동의 비대칭성, A_η^s 는 다음과 같이 계산하였다.

$$A_\eta^s = - \frac{\langle \mathcal{J}(H(\eta))^3 \rangle}{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^2 \rangle^{3/2}} \quad (13)$$

여기서 \mathcal{J} 는 허수부분이고, H 는 힐버트 변환(Hilbert transform)을 나타낸다.

위에 기술된 방법을 이용하여 본 연구의 폭풍침식 조건과 평상퇴적 조건에 대하여 역저류, 왜도 및 비대칭성을 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 외해방향 표사이동에 지배적으로 기여하는 역저류의 경우, 폭풍침식 조건에서의 값이 평상퇴적 조건에서의 값보다 강한 것을 알 수 있다. 또한, 해안방향 표사이동에 지배적으로 기여하는 것으로 알려진 왜도 및 비대칭성의 경우도 폭풍침식 조건에서의 값들이 평상퇴적 조건에서의 값들보다 큰 것으로 나타났다. 참고로 Mariño-Tapia et al. (2007a)는 파동 왜도는 쇄파대 안에서는 외해방향 표사이동에 기여하고 쇄파대 밖에서는 해안방향 표사이동에 기여한다고 밝히고 있다. 결론적으로 본 연구의 실험결과에 따르면 폭풍 조건에서도 해안방향 표사이동에 기여를 하는 파동 왜도 및 비대칭성이 상대적으로 크게 나타났으나, 강한 역저류에 의해 외해방향 표사이동에 의한 침식이 지배적이었던 것으로 보인다.

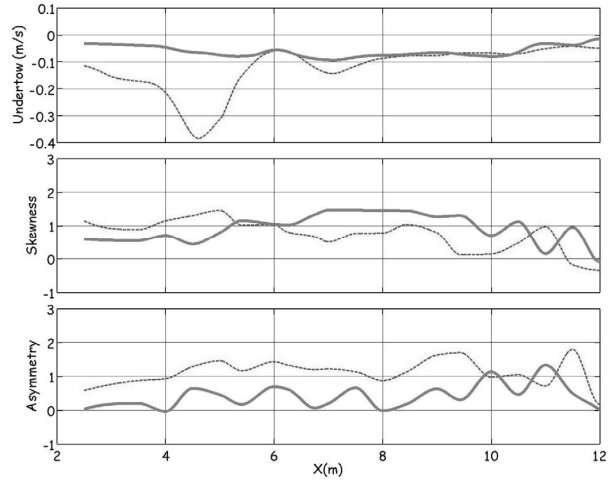


Fig. 9. Undertow Velocity and Skewness and Asymmetry of the Wave Motions Evaluated Based on the Surface Displacement Measured in the Present Experiment (The Gray Thick Lines Indicate the Results of the Normal Wave Case and the Broken Lines Indicate the Results of the Storm Wave Case)

다. 또한, 평상파 조건에서는 해안방향 표사이동에 기여를 하는 파동 왜도 및 비대칭성이 상대적으로 약하게 나타났으나, 역저류가 약함에 따라 퇴적이 지배적이었던 것으로 보인다. 따라서 본 연구의 조건에서는 입사파 조건에 따른 파동 비선형성의 차이보다는 이와 상호작용하는 역저류의 강약에 따라 침퇴적이 결정되는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 파랑전파 방향 표사이동 메커니즘에 대한 이해를 얻기 위해 2차원 단면 조파수로에서 폭풍 및 평상단면 지형에 대한 이동상 수리실험을 수행하였다. 일정 지형경사 0.04를 초기조건으로 입경이 $D_{50} = 0.18 \text{ mm}$ 인 실험표사를 선정하여, 침강 속도에 대해 Froude 상수를 근사적으로 만족하는 약 1/10 모형을 구축하였다. 실험은 일정경사의 초기 지형으로부터 평상파 조건 120분과 폭풍파 조건 60분을 번갈아 수행하였다. 폭풍파 조건에서 사주가 생성되며, 포말대 경사가 급해짐을 알 수 있었고, 평상파에서 생성된 사주가 소멸되는 것을 알 수 있었다. 폭풍파 조건과 평상파 조건의 누적 표사 이동량 분석을 통하여 폭풍파는 관측 구간에서 표사 유출을 보이고 평상파는 표사의 유입을 보였다. 이로부터 폭풍파가 입사할 때 침식되고 평상파가 입사할 때 퇴적되는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 평형 상태에 도달한 실험결과를 이용한 침퇴적 단면 지수 분석과도 일치하는 결과이다.

수면자료를 분석하여 역저류(undertow)를 추정하고, 비선형 파유동의 왜도(skewness) 및 비대칭성(asymmetry)을 산정하여,

역저류에 의한 외해방향 표사이동 메커니즘과 비선형 파동에 의한 해안방향 표사이동 메커니즘의 상호작용을 분석하였다. 본 실험연구에서는 외해방향 표사이동에 기여하는 역저류 뿐만 아니라 해안방향 표사이동에 기여하는 파동 왜도 및 비대칭성도 정상퇴적 조건에서 보다 폭풍침식 조건에서 상대적으로 크게 나타났다. 폭풍침식 조건에서는 강한 역저류에 의한 외해방향 표사이동으로 침식이 지배적인 것으로 보이지만, 정상퇴적 조건에서는 해안방향 표사이동에 기여하는 파동 왜도 및 비대칭성에 의한 유동과 약하지만 여전히 존재하는 역저류의 상호작용에 의해 지형변화가 발생하는 것으로 보인다.

향후 연구를 통해 유속을 계측하여 역저류와, 비선형 파유동의 왜도 및 비대칭성을 검증할 수 있을 것으로 보이며, 순간적으로 강한 쇄파의 붕괴(plunging) 효과로 촉발되는 표사이동 및 주기적 운동의 상호작용에 따른 지형변동 연구도 필요하다고 판단된다. 본 연구는 규칙파 조건으로 실험을 수행하여 반사파에 의한 위상의 상호작용 영향이 계측되었다. 부분 중복파의 형성은 파유동의 왜도 및 비대칭성을 변화시키므로 반사파 영향에 따른 지형변화도 추가 연구가 필요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양과학조사 및 예보기술개발사업으로 “이안류거동특성파악 및 실시간 예측기법 고도화(No. 20160257)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Alsina, J. M., Cáceres, I., Brocchini, M. and Baldock, T. E. (2012). “An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions.” *Coastal Eng.*, Vol. 68, pp. 31-43.
- Arcilla, A. S., Roelvink, J. A., O'Connor, B. A., Reniers, A. and Jimenez, J. A. (1994). The Delta flume '93 experiment, *Proc. Coastal Dynamics '94*, ASCE, pp. 488-502.
- Baldock, T. E. and Huntley, D. A. (2002). “Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach.” *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 458, pp. 2177-2201.
- Baldock, T. E., Manoovoravong, P. and Kim, S. P. (2010). “Sediment transport and beach morphodynamics induced by free long waves, bound long waves and wave groups.” *Coastal Eng.*, Vol. 57, pp. 898-916.
- Baldock, T. E., Alsina, J. A. and Cáceres, 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 Eng.*, Vol. 58, pp. 214-227.
- Battjes, J. A. (1974). “Surf similarity, paper presented at 14th Int. Conf. on Coast. Eng., Coastal Eng. Res. Council., Copenhagen, Denmark.
- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. (1978). “Energy loss and set-up due to breaking of random waves, paper presented at 16th Int. Conf. on Coast. Eng., Coastal Eng. Res. Council., Hamburg, Germany.
- Berni, C., Barthélemy, E. and Michallet, H. (2013). “Surf zone cross-shore boundary layer velocity asymmetry and skewness : an experimental study on a mobile bed.” *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 118, pp. 2188-2200.
- Cazenave, A., Lombard, A. and Llovel, W. (2008). “Present-day sea level rise : A synthesis.” *C. R. Geosci.*, Vol. 340, No. 11, pp. 761-770.
- Choi, J., Kirby, J. T. and Yoon, S. B. (2015). “Boussinesq modeling of longshore currents in the SandyDuck experiment under directional random wave conditions.” *Coastal Eng.*, Vol. 101, pp. 17-34.
- Choi, J., Lee, J.-I. and Yoon, S. B. (2012). “Surface roller modeling for mean longshore current over a barred beach in a random wave environment.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1100-1120.
- Cienfuegos, R., Barthelemy, E. and Bonneton, P. (2010). “Wave-breaking model for Boussinesq-type equations including roller effects in the mass conservation equation.” *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 136, No. 1, pp. 10-26.
- Dally, W. R. and Brown, C. A. (1995). “A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents.” *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, No. C12, pp. 24,873-24,883.
- Dalrymple, R. A. (1992). “Prediction of storm/normal beach profiles.” *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 118:2, No. 193, pp. 193-200.
- Dean, R. G. (1973). “Heuristic models of sand transport in the surf zone, in Engineering Dynamics of the Coastal Zone.” *First Australian Conf. on Coast. Eng.*, Sydney, 208-214.
- Elgar, S. (1987). “Relationships involving third moments and bispectra of a harmonic process” *IEEE Trans. Acoust. Speech, and Signal Processing*, ASSP-35, 12.
- Fernández-Mora, A., Calvete, D., Falqués, A. and de Swart, H. E. (2015). “Onshore sandbar migration in the surf zone : New insights into the wave-induced sediment transport mechanisms. *Geophysical research letters*, Vol. 42, No. 8, pp. 2869-2877.
- Grasso, F., Michallet, H., Barthelemy, E. and Certain, R. (2009). “Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology : Transients and equilibrium states.” *J. Geophys. Res.*, 114, C09001.
- Goda, Y. (2006). “Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves.” *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 157-170.
- Hattori, M. and Kawamata, R. (1980). “Onshore-offshore transport and beach profile change.” *Proc. of the 17th Int. Conf. on Coast. Eng.*, ASCE, Sydney, Australia, pp. 1175-1193.
- Henderson, S. M., Allen, J. S. and Newberger, P. A. (2004). “Nearshore sandbar migration predicted by an eddy-diffusive boundary layer model.” *J. Geophys. Res.*, 109, C05025.
- Hsu, T.-J., Elgar, S. and Guza, R. T. (2006). “Wave-induced sediment transport and onshore sandbar migration.” *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 817-824.
- Hoefel, F. and Elgar, S. (2003). “Wave-induced sediment transport

- and sandbar migration." *Science*, Vol. 299, pp. 1885-1887.
- Kirby, J. T., Özkan-Haller, H. T. and Haller, M. C. (2006). "Seiching in a large wave flume." *Proc. of Int. Conf. on Coast. Eng.*, San Diego, CA, pp. 1159-1171.
- Kömürcü, M. İ., Özölçer, İ. H., Yüksek, Ö. and Karasu S. (2007). "Determination of bar parameters caused by cross-shore sediment movement." *Ocean Eng.*, Vol. 34, pp. 685-695.
- Kraus, N. C. and Smith, J. M. (1994). "SUPERTANK Laboratory data collection project." *Technical report CERC-94-3, U.S. army engineer waterways experiment station*, Vicksburg, MS, Vol. 1-2.
- Kraus, N. C. and Mason, J. M. (1993). "Discussion of 'Prediction of storm/normal beach profiles' by Robert A." Dalrymple (March/April, 1992, Vol. 118, No. 2). *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 119:4, No. 468, pp. 468-470.
- Kriebel, D. L., Dally, W. R. and Dean, R. G. (1986). "Undistorted froude model for surf zone sediment transport." *Coastal Eng.*, Vol. 20, pp. 1296-1310.
- Lippmann, T. C., Brookins, A. H. and Thornton, E. B. (1996). "Wave energy transformation on natural profiles." *Coastal Eng.*, Vol. 27, pp. 1-20.
- Liu, W. and Tajima, Y. (2014). "Image-based study of breaking and broken wave characteristics in front of the seawall." *Proc. of 34th Int. Conf. on Coast. Eng.*, ASCE, Seoul.
- Mariño-Tapia, I. J., Russell, P. E., O'Hare, T. J., Davidson, M. A. and Huntley, D. A. (2007a). "Cross-shore sediment transport on natural beaches and its relation to sandbar migration patterns : 1." *Field observations and derivation of a transport parameterization, J. Geophys. Res.*, 112, C03001.
- Mariño-Tapia, I. J., O'Hare, T. J., Russell, P. E., Davidson, M. A. and Huntley, D. A. (2007b). "Cross-shore sediment transport on natural beaches and its relation to sandbar migration patterns : 2." *Application of the field transport parameterization, J. Geophys. Res.*, 112, C03002.
- Martinez, M. L., Intralawan, A., Vazquez, G., Perez-Maqueo, O., Sutton, P. and Landgrave, R. (2007). "The coasts of our world : Ecological, economic and social importance." *Ecol. Econ.*, Vol. 63, No. 2-3, pp. 254-272.
- Michallet, H., Cienfuegos, R., Barthélemy, E. and Grasso, F. (2011). "Kinematics of waves propagating and breaking on a barred beach." *Eur. J. Mechanics B/Fluids*, Vol. 30, pp. 624-634.
- Reniers, A. J. H. M. and Battjes, J. A. (1997). "A laboratory study of longshore currents over barred and non-barred beaches." *Coastal Eng.*, Vol. 30, pp. 1-22.
- Rouse, H. (1937). "Nomogram for the settling velocity of spheres." *National Research Council*, Washington, DC. 57-64.
- Ruessink, B. G., Walstraa, D. J. R. and Southgate, H. N. (2003). "Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches." *Coastal Eng.*, Vol. 48, pp. 139-149.
- Ruessink, B. G., Kuriyama, Y., Reniers, J. H. M., Roelvink, J. A., Walstra, D. J. R. (2007). "Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks." *J. Geophys. Res.*, 112, F03010.
- Schäffer, H. A. (1993). "Infragravity waves induced by short wave groups." *J. Fluid Mech.*, Vol. 247, pp. 551-588.
- Srisuwan, C., Work, P., Karasu, S. and Özölçer, İ. (2015). "Beach profile model with size-selective sediment transport. I : laboratory experiment and sensitivity study." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 141, No. 2, 04014032.
- Stive, M. J. F. and deVriend, H. J. (1994). "Shear stresses and mean flow in shoaling and breaking waves." *Proc. of the 24th Int. Conf. on Coast. Eng.*, ASCE, pp. 594-608.
- Svendsen, I. A. (1984a). "Wave heights and set-up in a surf zone." *Coastal Eng.*, Vol. 8, pp. 303-329.
- Svendsen, I. A. (1984b). "Mass flux and undertow in a surf zone." *Coastal Eng.*, Vol. 8, pp. 347-365.
- Tajima, Y. and Madsen, O. S. (2003). "Modeling near-shore waves and surface roller." *Proc. of the 2nd Conf. of Asian and Pacific Coasts*, Paper no. 28.
- Thornton, E. B. and Guza, R. T. (1983). "Transformation of wave height distribution." *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, No. C10, pp. 5925-5938.
- Wang, P. and Kraus, N. C. (2005). "Beach profile equilibrium and patterns of wave decay and energy dissipation across the surfzone elucidated in a large-scale laboratory experiment." *J. Coastal Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 522-534.
- Williams, J. J., Buscombe, D., Masselink, G., Turner, I. L. and Swinkels, C. (2012). "Barrier dynamics experiment (BARDEX) : Aims, design and procedures." *Coastal Eng.*, Vol. 63, pp. 3-12.
- Wright, L. D. and Short, A. D. (1984). "Morphodynamic variability of surf zones and beaches : A synthesis." *Mar. Geolo.*, Vol. 56, pp. 93-118.
- Yoon, H.-D. and Cox, D. T. (2010). "Large-scale laboratory observations of wave breaking turbulence over an evolving beach." *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, C10007.