

맹방해안에서 관측되는 Beach Cusp의 일 년에 걸친 대순환 과정과 계절별 특성 - 여러 생성기작 중 포획모드 Edge Waves를 중심으로 Grand Circulation Process of Beach Cusp and its Seasonal Variation at the Mang-Bang Beach from the Perspective of Trapped Mode Edge Waves as the Driving Mechanism of Beach Cusp Formation

조용준*
Yong Jun Cho*

요지 : 파랑관측 자료와 실측된 해안선 위치를 활용하여 맹방해안에 형성되는 beach cusp의 일 년에 걸친 대순환 과정과 계절별 특성을 포획모드 Edge waves와 beach cusp의 인과 관계를 중심으로 살펴보았다. 맹방표사 계에 출현하는 beach cusp의 시공을 통한 변화 추이를 가늠하기 위해 threshold 상향통과 법으로 특정된 각 beach cusp의 파장과 진폭을 활용하여 정량화하였으며, 스펙트럼 해석의 경우에는 spectral mean sand wave number를 도입하여 정량화하였다. Spectral mean sand wave number의 시계열자료로부터 sand wave의 융합과 분할이 반복되는 주기를 산출하는 경우 beach cusp의 대순환과정은 일 년에 두 번에 걸쳐 진행되는 것으로 보인다. 해빈면적의 경우 해빈 대순환 과정이 완성되는 일 년을 기준으로 14,142 m² 정도 증가하였으며, quadratic 회귀 분석하여 얻은 평균 해안선의 경우 맹방해안 남단과 북단에서는 18 m, 맹방해안 중앙부에서는 2.4 m 내외로 전진하였다. 해빈면적은 2017.11.26부터 2017.12.22 사이에 30,345 m² 내외로 급속하게 증가하였으며, 이렇게 급속한 해빈면적 증가는 상당히 예외적인 것으로 11월 26일부터 12월 22일 사이에 맹방해안으로 내습한 파랑의 성격에 기인하는 것으로 판단된다. 전술한 기간은 온화한 장주기 너울이 지배적이며, 대부분의 파랑이 영의 영각에 가깝게 맹방해안으로 내습한다. 이러한 파랑조건은 주 표사 이송모드가 횡단 표사라는 것을 의미하며 자연 해빈의 자기 치유능력이 횡단 표사를 통해 구현된다는 사실을 상기하면 전술한 해빈면적의 급속한 증가는 영의 영각으로 진입하는 파랑의 경계층 streaming에 의해 해안방향으로 회귀되는 표사가 누적되어 발생하는 것으로 판단된다.

핵심용어 : beach cusp, 파별 해석법, 스펙트럼 해석법, trapped mode Edge waves, spectral mean sand wave number, 퇴적성 해빈, 침식성 해빈

Abstract : Using the measured data of waves and shore-line, we reviewed the grand circulation process and seasonal variation of beach cusp at the Mang-Bang beach from the perspective of trapped mode Edge waves known as the driving mechanism of beach cusp. In order to track the temporal and spatial variation trends of beach cusp, we quantify the beach cusp in terms of its wave length and amplitude detected by threshold crossing method. In doing so, we also utilize the spectral analysis method and its associated spectral mean sand wave number. From repeated period of convergence and ensuing splitting of sand waves detected from the yearly time series of spectral mean sand wave number of beach cusp, it is shown that the grand circulation process of beach cusp at Mang-Bang beach are occurring twice from 2017. 4. 26 to 2018. 4. 20. For the case of beach area, it increased by 14,142 m² during this period, and the shore-line advanced by 18 m at the northern and southern parts of the Mang-Bang beach whereas the shore-line advanced by 2.4 m at the central parts of Mang-Bang beach. It is also worthy of note that the beach area rapidly increased by 30,345 m² from 2017.11.26. to 2017.12.22. which can be attributed to the nature of coming waves. During this period, mild swells of long period were prevailing, and their angle of attack were next to zero. These characteristics of waves imply that the main transport mode of sediment would be the cross-shore. Considering the facts that self-healing capacity of natural beaches is realized via the cross-shore sediment once temporarily eroded. it can be easily deduced that the sediment carried by the boundary layer streaming toward the shore under mild swells which normally incident toward the Mang-Bang beach makes the beach area rapidly increase from 2017.11.26. to 2017.12.22.

Keywords : beach cusp, wave by wave analysis, spectral analysis, trapped mode Edge waves, spectral mean sand wave number, reflective beach, erosive beach

*서울시립대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, University of Seoul 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504 Korea, Tel: +82-2-6490-2427, Fax: +82-2-6490-2424, young@uos.ac.kr)

1. 서 론

자연해안의 경우 해안선이 원호모양으로 먼 바다를 향해 번갈아가며 나가고 들어오는 것이 흔히 관측되며 이러한 원호모양의 해안선은 beach cusp이라 불린다. 현재 상당한 침식이 진행되고 있는 우리나라 맹방해안에서도 상당히 다양한 크기의 beach cusp를 관측 할 수 있다. 이러한 beach cusp은 해변 대순환과정을 구성하는 중요한 요소라는 점에서 맹방해안 beach cusp의 형태학적 특성, 계절적 변화 양상, 생성기작을 살펴보는 작업은 상당한 공학적 가치를 지니며, 해변침식 대응방안 최적화 과정에도 적지 않은 역할을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

Beach cusp의 생성 원인으로는 연안류에 대한 해저지형의 불안정성으로 보는 시각과 포획모드 Edge waves에 기인하다는 시각이 공존해 왔으나(Guza, 1974), 고정상(non-erodable bed)에서 수행된 수리모형 실험에서도 관측되는 포획 모드의 Edge waves를 설명할 수 없다는 점에서 연안류와 연계된 해저지형의 불안정성이라는 시각은 최근 들어 설득력을 잃어버린 듯하다. Beach cusp의 생성기작으로 포획모드 Edge waves의 가능성을 맨 처음 제기한 이는 Guza(1974)로, 이 연구에서 Guza(1974)는 단조해안을 대상으로 먼저, 해안과 이웃한 전빈 해역에서는 비선형 천수 방정식이 유효한 파랑모형이 될 수 있음을 보이고, 이어 비선형 천수 방정식을 섭동법(perturbation method)으로 해석하여, 해안 인근 수역에 Edge waves를 생성하는 파랑조건과 이로 인해 결과 되는 포획모드 Edge waves의 연안 방향 파수와 진폭 성장률에 대한 해석 해를 제시한 바 있다. 이 연구에서 Guza(1974)는 먼저 Edge waves가 비선형 천수 방정식을 충족하는 여러 일반해 중의 하나라는 것을 보이고, 이어 단조해안에서 상당한 반사가 진행되는 경우 형성되는 정상파는 Edge waves에 대해 불안정하며 resonance triad 혹은 quartet(Fig. 1 참조)가 충족되는 경우 포획모드의 Edge waves가 출현할 수 있다는 것을 규명한 바 있다. Guza(1974)에 따르면 가장 쉽게 자극될 수 있는 Edge waves의 주기는 입사파 주기의 2배로 이는 Hasselmann(1967), Phillips(1980) 이 후 해안공학 계에서 풍성파의 성장과정과

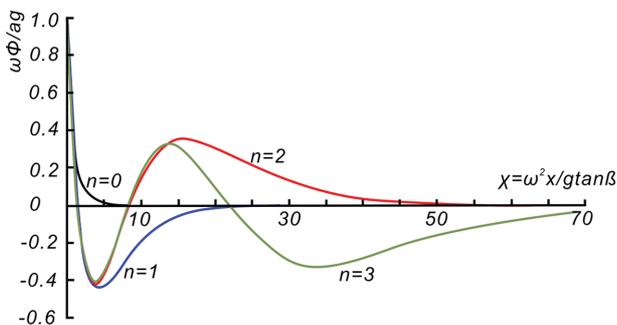


Fig. 1. Offshore dependence of profiles of Eckart type edge waves of modes $n = 0, 1, 2,$ and 3 in terms of the non-dimensional variable $\chi = \omega^2 x / g \tan \beta$.

관련하여 널리 알려진 sub-harmonic resonance와 결을 같이 하며, 포획모드 Edge waves가 출현하는 경우 정상 파동계의 진폭은 예외 없이 감소한다는 사실도, 입사 파랑에 상당한 반사파가 더해져 생성된 정상파동계와 Edge waves 사이에 존재하는 인과관계를 뒷받침 한다. 이렇게 형성된 포획모드 Edge waves로 인해 해변 묘사는 재배치되며 이는 beach cusp으로 이어진다는 것은 Guza(1974)가 수행한 이동상 수리실험을 통해 예증된 바 있다.

이상의 논의에서 알 수 있듯 맹방 해안에 beach cusp이라는 커다란 흔적을 남기는 포획모드 Edge waves가 형성되기 위해서는 상대적으로 높은 반사율로 인한 정상 파동계가 전제되어야 하며, 따라서 천수의 최종단계에서 발생하는 역동적인 쇄파로 파랑에너지의 대부분이 소실되는 plunging breaker에서는 포획모드의 Edge waves는 찾아볼 수 없으며, 주로 surging 형태의 breaker에서 출현한다. 이러한 시각에서 본 논문에서는 맹방해안 전면해역 수심이 26.5 m인 지점에서 2017.4.26.~2018.4.20 사이에 실측된 파랑관측 자료(Cho and Kim, 2019)와 2017.3.11.부터 2018.3.14. 사이에 총 11번 걸쳐 실측된 해안선 위치(Cho et al., 2019)를 활용하여, 맹방해안에 형성되는 beach cusp의 일 년에 걸친 대순환 과정과 계절별 특성, beach cusp의 여러 생성기작 중 포획모드 Edge waves를 중심으로 Edge waves에 의해 결과 되는 beach cusp의 상관관계를 살펴보고자 한다.

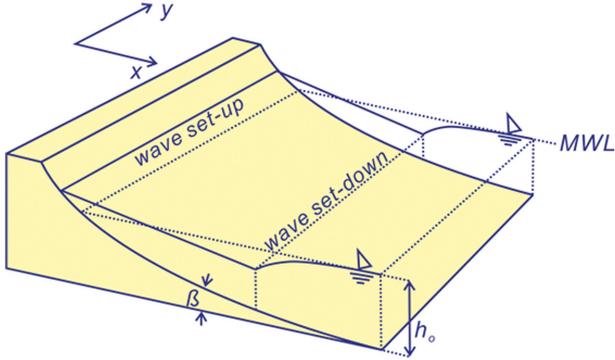
2장에서는 이해를 돕기 위해 beach cusp의 생성기작으로 알려진 포획모드의 sub-harmonic Edge waves와 synchronous Edge waves에 대한 기존의 연구를 정리하였다. 3장에서는 맹방해안에서 관측되는 Edge waves의 수리학적 특성, beach cusp의 대순환 과정, Edge waves와 beach cusp의 상관관계를 정리하였다. 3장에서는 beach cusp을 정량화 과정에 활용된 threshold 상향통과 법과 spectral mean sand wave number도 함께 다룬다.

2. 맹방해안 Beach Cusp의 생성기작으로 알려진 Edge Waves에 대한 기존의 연구

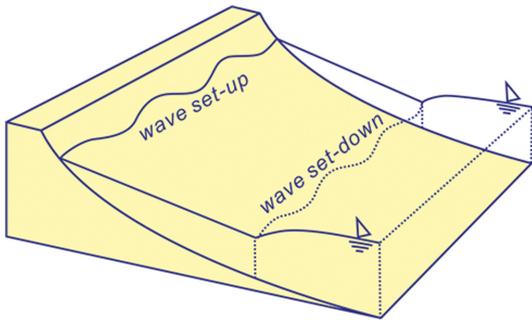
2.1 Free mode Edge waves

전빈에 형성되는 포획모드 Edge waves로 인해 원호모양 해안선(beach cusp)이 형성되는 것을 수리모형 실험을 통해 맨 처음 예증한 이는 Guza(1974)로 이 후 포획모드의 Edge waves는 계절별 해변변형 해석 혹은 이안류로 대표되는 연안 수리해석에 중요한 논리적 근거로 기능하여 왔다. 우리나라 맹방해안에 형성되는 beach cusp의 형태학적 특성과 대순환 과정을 이해하기 위해서는 포획모드 Edge waves의 생성과정을 이해할 필요가 있으며 이를 정리하면 다음과 같다.

Guza(1974)는 먼저 속도 포텐셜 $\Phi(x, y, t)$ 를 변수분리법을 활용하여 다음과 같이 가정하고



(a) in case of stable standing waves in the foreshore due to near-perfect reflection



(b) in case of un-stable standing waves in the foreshore leading to the formation of the trapped mode edge waves

Fig. 2. Schematic sketch of edge waves due to the instability of standing waves and local coordinate system.

$$\Phi = \phi(x)\cos(k_y y + \Delta)\sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

천수방정식으로부터 완만한 경사를 지니는 전빈에서의 파랑 모형을 유도하였으며 이를 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx}\left(x\frac{d\phi}{dx}\right) + \left(\frac{\omega^2}{g\tan\beta} - k_y^2 x\right)\phi = 0 \quad (2)$$

식(1), (2)에서 k_y 는 y 방향 wave number(Fig. 2 참조), β 는 저면 경사(Fig. 2 참조), ω 는 wave frequency, g 는 중력 가속도, Δ 과 θ 는 각각 phase를 나타내며, 식(2)의 유도과정에는 질량보존식이 활용된다.

식(2)에 정의된 파랑모형을 충족하는 일반해는 다수 존재하며 상당한 반사율을 지니는 surging 형태의 입사파가 해안에 영의 영각으로 내습 시($k_y = 0$) 형성되는 정상파의 경우 일반해(Fig. 1 참조)는 해안공학계에 널리 알려진 것처럼 다음과 같이 기술될 수 있다(Guza, 1974).

$$\hat{\Phi} = J_0(2\hat{x}^{1/2})\sin(\hat{t}) + \varepsilon\frac{1}{(4\hat{x})^{1/2}}J_0(2\hat{x}^{1/2})J_1(2\hat{x}^{1/2})\sin 2\hat{t} \quad (3)$$

식(3)에서 J_0 는 제일종 영차 Bessel 함수, J_1 는 제일종 일차 Bessel 함수를 각각 나타내며 무차원 변량 $\hat{\Phi}$, \hat{x} , \hat{t} 와 perturbation parameter ε 는 각각 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\hat{\Phi} = \frac{\omega}{ag}\Phi \quad (4)$$

$$\hat{x} = \frac{\omega^2}{g\tan\beta}x \quad (5)$$

$$\hat{t} = \omega t \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{a\omega^2}{g\tan^2\beta} \quad (7)$$

식(4), (7)에서 a 는 입사파 진폭을 나타낸다.

식(1)에서 $\omega^2 < gk_y$ 인 경우 해안에서 반사된 파랑은 굴절로 인해 먼 바다를 향해 빠져나가지 못하고 다시 해안방향으로 회귀되며 이렇게 이어지는 반사, 굴절로 인한 회귀로 해안 인근 전빈 수역에 포획된 모양으로 해안과 나란하게 진행되며, 이러한 성정으로 인해 포획모드 Edge waves라 불리며, 반대 방향으로 진행하는 또 다른 Edge waves와 조우하는 경우 정상파 형태의 Edge waves를 형성하게 된다.

전술한 Edge waves 중 물리적으로 가능한 Edge waves는 Eckart(1951)에 의해 처음 밝혀진 바 있다. Eckart(1951)에 의하면 전빈 경사가 완만하면 특정된 입사파 주기에 대해 다양한 모드의 Edge waves가 출현 가능하며, 이 경우 속도 포텐셜 $\Phi(x, y, t)$ 을 구성하는 $\phi(x)$ 와 분산관계식은 각각 다음과 같이 기술될 수 있으며,

$$\phi(x) = e^{-k_y x} L_n(2k_y x) \quad (8)$$

$$\omega^2 = g|k_y|(2n+1)\tan\beta \text{ for } (2n+1)\beta \ll 1 \quad (9)$$

여기서 n 은 Edge waves의 모드 number, L_n 은 LaGuerre polynomial(Abramowitz and Stegun, 1965)을 각각 나타내며 Table 1에는 차수별 LaGuerre polynomial을 정리하여 수록하였다.

Edge waves가 해안에 가까운 전빈 수역에 포획되기 위해서는 Edge waves의 파수 k_y 는 다음과 같은 관계식을 충족하여야 하며

$$k_y < k_f \quad (10)$$

여기서 k_f 는 조석 terrace($h = h_0$)(Fig. 5 참조)에서의 입사파 파수를 나타내며 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$\omega^2 = gk_f \tanh k_f h_0 \quad (11)$$

식(10), (11)로부터 포획모드 Edge waves가 출현하기 위해

Table 1. List of LaGuerre polynomial L_n

Mode n	L_n
0	1
1	$1 - x$
2	$(x^2 - 4x + 2)/2$
3	$(-x^3 + 9x^2 - 18x + 6)/6$
4	$(x^4 - 16x^3 + 72x^2 - 96x + 24)/24$

Table 2. List of minimum beach width χ_{min}

Mode n	χ_{min}
0	-
1	6.5
2	21.0
3	43.5

Table 3. Maximum Edge wave periods T_{max} for each mode and various offshore depth with beach face slope of $\beta=6^\circ$ [from Guza(1974)]

Mode n	$h_o = 1$ m	$h_o = 2$ m	$h_o = 3$ m
0	43.9 s	63.4 s	77.8 s
1	7.5 s	10.6 s	13.0 s
2	4.2 s	5.9 s	7.2 s
3	2.9 s	4.1 s	5.0 s

소요되는 최소 해변 폭 χ_{min} 을 산출할 수 있으며 이를 Edge waves 모드별로 정리하면 다음과 같으며,

여기서 최소 해변 폭 χ_{min} 은 다음과 같이 정규화 하였으며,

$$\chi_{min} = \frac{\omega^2 x_{min}}{g \tan \beta} \quad (12)$$

식(9)에 정의된 Edge waves의 분산관계식을 활용하는 경우 χ_{min} 은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\chi_{min} = |k_y|(2n+1)x_{min} \quad (13)$$

맹방해변에서의 전빈 경사를 β , 조석 terrace에서의 수심 h_o 을 각각 1 m, 2 m, 3 m라고 가정하는 경우 전빈에서 출현 가능한 포획모드 Edge waves의 주기를 가늠해 볼 수 있으며 이 과정을 정리하면 다음과 같다:

A. 먼저 각 h_o 에 대해 해안선까지의 거리를 다음과 같이 산출하고

$$x_{min} = \frac{h_o}{\tan \beta} \quad (14)$$

B. Table 2로부터 Edge waves 형성에 필요한 최소 해변 폭 χ_{min} 을 모드별로 특정하고 이렇게 특정된 χ_{min} 으로부터 $|k_y|$ 를 다음과 같이 산출한다.

$$\chi_{min} = |k_y|(2n+1)x_{min} \quad (15)$$

C. 이어 주기 T_{max} 는 Edge waves의 분산관계식으로부터 다음과 같이 산출될 수 있으며,

$$\omega^2 = g|k_y|(2n+1)\tan \beta \quad (16)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g|k_y|(2n+1)\tan \beta$$

Table 3에는 각 모드와 수심 별로 산출한 T_{max} 를 정리하여 수록하였다.

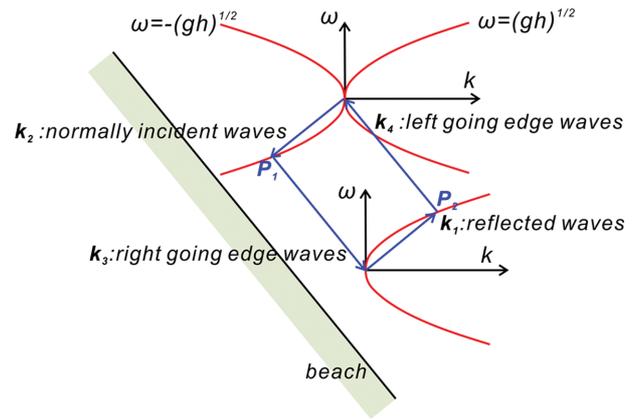


Fig. 3. A diagram in wave number, frequency space illustrating the four components that satisfy the resonance condition in Eq. (3), where the dispersion relation, $\omega = \pm \sqrt{gh}$, is represented by trumpet shaped surface in three-dimensional spaces following Phillips [1980].

2.2 공진성 상호작용(resonant quartet interaction)에 의한 sub-harmonic Edge waves

해안에서 surging 형태의 쇄파가 진행되는 경우 파랑에너지 소산률은 상대적으로 미미하며 이 경우 반사율은 상당할 수 있으며 이는 전면 해역 형성되는 정상파로 이어지며, 이렇게 형성된 정상파는 식(3)에 의해 기술될 수 있다. Guza (1974)에 의하면 전술한 정상파는 해안을 따라 진행되는 free mode Edge waves에 불안정하며, 서로 상이한 방향으로 진행되는 두 개의 free mode Edge waves와 직각으로 입사되는 파랑과 반사파가 resonant triad 혹은 quartet(Fig. 3 참조)을 구성하는 경우 정상파가 지니는 파랑에너지는 Edge waves로 유입된다. 유입된 파랑에너지로 Edge waves의 진폭은 증가하며 이렇게 성장한 포획 모드 Edge waves로 인해 전빈에 거치된 표사는 재배치되며 중국에는 beach cusp이라는 흔적을 남기게 된다. 이 연구에서 Guza(1974)는 Hasselman(1967)의 연구 성과를 토대로 Edge waves의 주기가 입사되는 파랑 주기의 2배인 경우 Edge waves는 가장 쉽게 자극되는 것으로 결론지은 바 있다. Fig. 3에는 이해를 돕기 위해 $[k, \omega]$ 공간에서 공진조건을 충족하는 네 개 성분파랑을 예시하였다(Cho and Bae, 2019). Fig. 3에서는 심해라는 가정을 수행하여 분산관계식을 $\omega = \pm \sqrt{gh}$ 로 간략화 하였으며, 전술한 분산관계식이 $[k, \omega]$ 공간에서 그리는 궤적 상에 위치하는 임의의 두 점 P_1, P_2 을 지나는 네 개 성분파랑 k_1, k_2, k_3, k_4 는 공진조건을 충족한다(Phillips, 1980).

2.3 Synchronous Edge waves

2.2절에서 다룬 resonance triad 혹은 quartet에 의해 출현한 sub-harmonic edge wave는 표사계에 beach cusp이라는 흔적을 남기고 소멸되며, beach cusp을 유지하는 것은 내습하는 파랑과 동일한 주기를 지니는 synchronous Edge waves로 전해진다(Dodd et al., 2008). Beach cusp과 영의 영각으

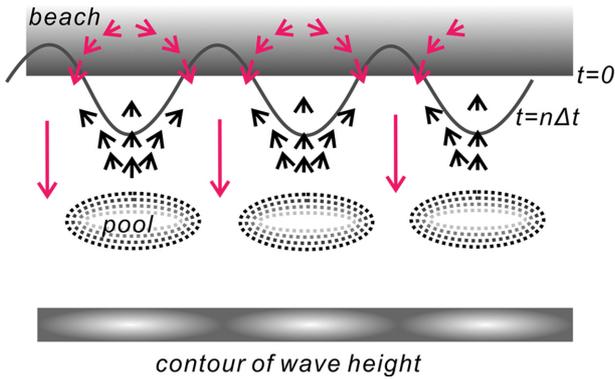


Fig. 4. Schematic sketch of the interaction of synchronous edge wave with beach cusp.

로 해안으로 내습하는 파랑이 교감하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

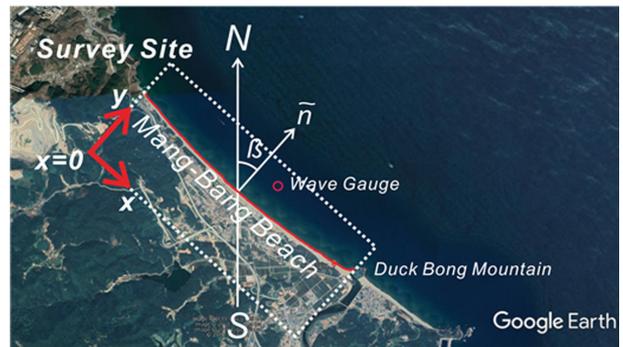
파고가 연안으로 일정하지 않은 파랑이 영의 영각으로 내습하는 경우 상대적으로 큰 파고에 노출된 영역에서는 초오름 높이가 크기 마련으로 이 경우 초오름(up-rush) 정점에서 흐름은 방향을 틀어 초오름 높이가 작은 영역으로 나뉜다(Fig. 4 참조). 이렇게 집수가 이루어지는 해역에서는 처내려지는 흐름(back-wash)의 강도는 증가하며, 집수 해역에는 만이, 높은 초오름이 진행되는 해역에는 돌출부가 형성된다. 이 과정에서 돌출부에서는 초오름(up-rush) 정점에서 바뀐 흐름 방향으로 인해 먼 바다로 회귀되는 back-wash는 소멸된다(Fig. 4 참조). 이렇게 만에서 집수효과로 한층 강해진 back-wash는 후행하여 접근하는 파랑으로 인한 up-rush를 제한함으로써 파동계와 교감하며 결국 이러한 되먹임으로 인해 파동계에는 synchronous edge wave와 유사한 파동이 출현하고 beach cusp은 유지되는 것으로 전해진다(Dodd et al., 2008).

3. 맹방해안에서 관측되는 Edge waves의 수리학적 특성과 beach cusp의 대순환 과정

맹방해안에 형성되는 beach cusp의 규모와 일 년에 걸친 대순환 과정, beach cusp의 생성기작으로 알려진 포획모드 Edge waves의 수리학적 특성을 살펴보았다. 포획모드 Edge waves의 수리학적 특성 해석에는 맹방해빈 전면해역 수심이 26.5 m인 지점(Fig. 5 참조)에서 초음파식 파고계(Nortek)를 활용하여 2017.4.26~2018.4.20 사이에 실측된 파랑관측 자료가 활용되며(129°13'34.56" E 37°24'11.22" N), beach cusp의 규모와 일 년에 걸친 대순환 과정 해석에는 2017.3.11, 4.5, 5.21, 6.8, 7.17, 10.26, 11.7, 11.26, 12.22, 2018.1.22, 3.14에 실측된 해안선 위치가 활용된다(Cho et al., 2019). Fig. 6에는 횡단 방향으로 실측된 해빈 단면을 도시하였다. 맹방해빈은 해안선으로부터 60~80 m 이격된 지점까지 경사가 1/10 내외인 급경사의 전빈이 포진하며 이 후 수심이 5 m 내외인 간조단구(low tide terrace)가 이격거리가 200 m인 지점



(a) Snapshot of the Mang-Bang beach and its beach cusp



(b) Location of wave gauge and shoreline survey site, and the definition sketch of global co-ordinate system [N-S] and local coordinate system [x-y]

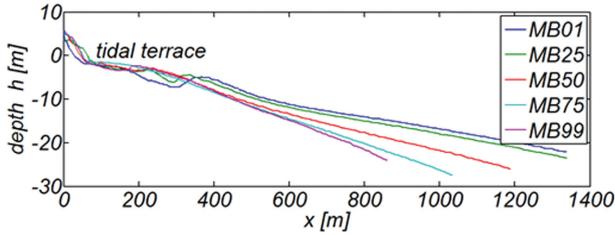
Fig. 5. Layout of the Mang-Bang beach and its beach cusp, the location of wave gauge and survey site, and the definition sketch of global co-ordinate system [N-S] and local coordinate system [x-y] (from Google Earth).

까지 길게 이어진다. 따라서 Edge waves가 포획되는 전빈 폭은 60 m에서부터 80 m 사이로 보이며(Fig. 6 참조), 이 경우 가능한 포획모드 Edge wave의 주기는 77.8 s에 해당되며, sub-harmonic resonance interaction을 통해 전술한 Edge wave을 자극할 수 있는 입사파는 주기가 38.9 s 내외인 외층력파로 보인다.

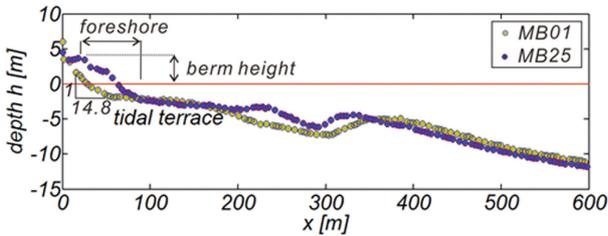
3.1 맹방 해안에서 관측되는 포획모드 Edge waves의 수리학적 특성

전절에서 다루었던 포획모드의 Edge waves가 출현하기 위해서는 surging 형태의 breaker가 선행 되어야 하며 breaker type은 Iribarren NO.로 가능해 볼 수 있다(Table 4 참조). Iribarren NO. ξ 는 쇄파선에서의 파고 H_b 와 심해에서의 파장 L_o 으로 기술하는 경우 다음과 같이 정의되며

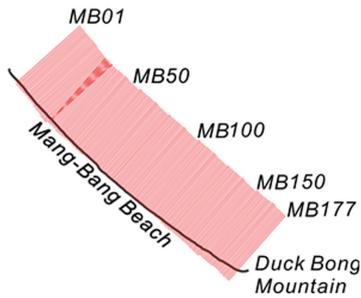
$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_o}}} \quad (17)$$



(a) Beach profile



(b) Zoom-in



(c) List of MB01~MB177 where beach profiles were measured

Fig. 6. Measured beach profiles across the shore of Mang-Bang and the location of survey site.

Table 4. Classification of wave breaker in terms of iribarren NO. ξ

Breaker type	ξ
Surging or collapsing	$\xi > 2.0$
Plunging	$0.4 < \xi < 2.0$
Spilling	$\xi < 0.4$

여기서 심해 파장 L_o 은 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (18)$$

Iribarren NO. ξ 에 따른 쇄파형태의 변화는 Table 4에 정리하였으며, Fig. 7에는 맹방해빈 전면해역 수심이 26.5m인 지점에서 2017.4.26.부터 2018.4.20. 사이에 관측된 유의파고 H_s , 침두 주기 T_p , 쇄파 선 x_b , Iribarren NO. ξ 의 시계열 자료를 도시하였다. $\xi > 2.0$ 인 경우에 발생하는 surging 형태의 쇄파는 비교적 완만한 너울성 장주기 파랑이 우월한 4월 말에서부터 7월 말 사이에 집중적으로 발생하는 것으로 보이며 (Fig. 7, 8, 9 참조), 2장에서 살펴보았듯 전술한 너울성 장주기 파랑은 맹방해빈에 가장 역동적인 beach cusp이라는 큰 흔적을 남기는 것으로 판단된다.

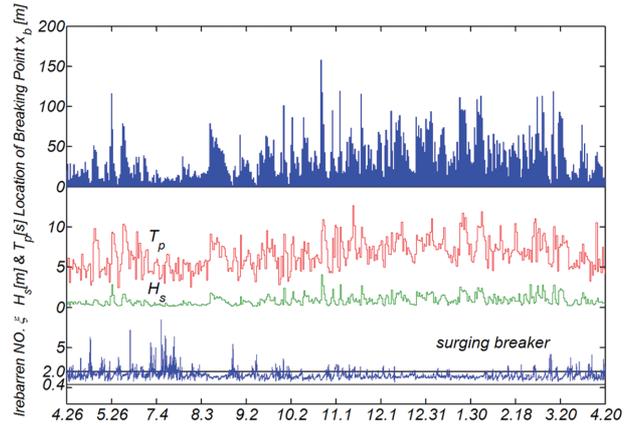


Fig. 7. Variation of breaking point x_b , peak period T_p , significant wave height H_s , and Iribarren NO. ξ over 2017.4.26~2018.4.20.

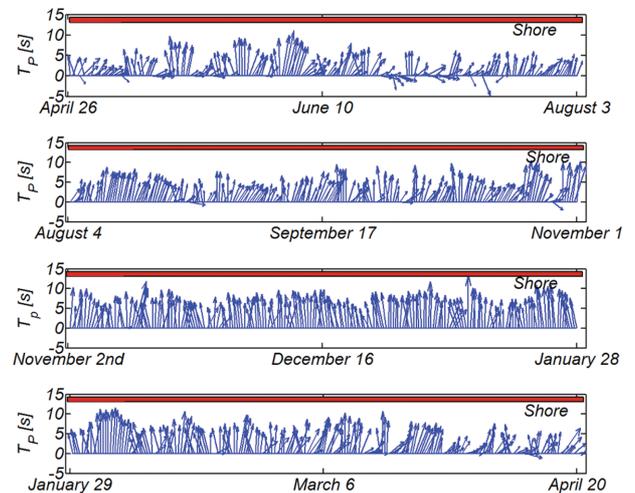


Fig. 8. Vector plot of wave period with its corresponding wave ray [modified from Cho et al. (2019)].

3.2 Beach cusp의 대순환 과정과 계절별 특성

Fig. 10(a)에는 맹방해안에서 2017.3.11부터 2018.3.14. 사이에 관측된 해안선을 전체 좌표계[Bessel TM(동부 원점) 좌표계]에서 도시하였으며, Fig. 10(b)에는 맹방 표사계의 침·퇴적 여부를 판별하기 위해 2017.3.11에 측정된 해안선을 해빈의 대순환 과정이 완성되는 2018.3.14에 관측된 해안선과 함께 도시하였다. 계절에 따른 해안선 변화가 상당하나 육안으로는 변화양상을 특정하기가 쉽지 않으나, 해빈 대순환 과정이 완성되는 일 년을 기준으로 하는 경우 맹방해빈 표사계는 beach cusp의 연안 방향으로의 단순 이동은 있으나, 상당히 안정적인 해빈으로 보인다.

맹방해안에서 형성되는 beach cusp의 규모와 진폭을 보다 명확하게 드러내기 위해 먼저 총 11회에 걸쳐 실측된 해안선을 국지 좌표계(Fig. 5 참조)로 mapping하고 mapping된 각각의 해안선을 quadratic 회귀 분석하여 평균 해안선을 도출하였다(Appendix A 참조). 이어 이렇게 찾아낸 평균 해안선을 mapping된 각각의 해안선으로부터 유리하여(de-trending)

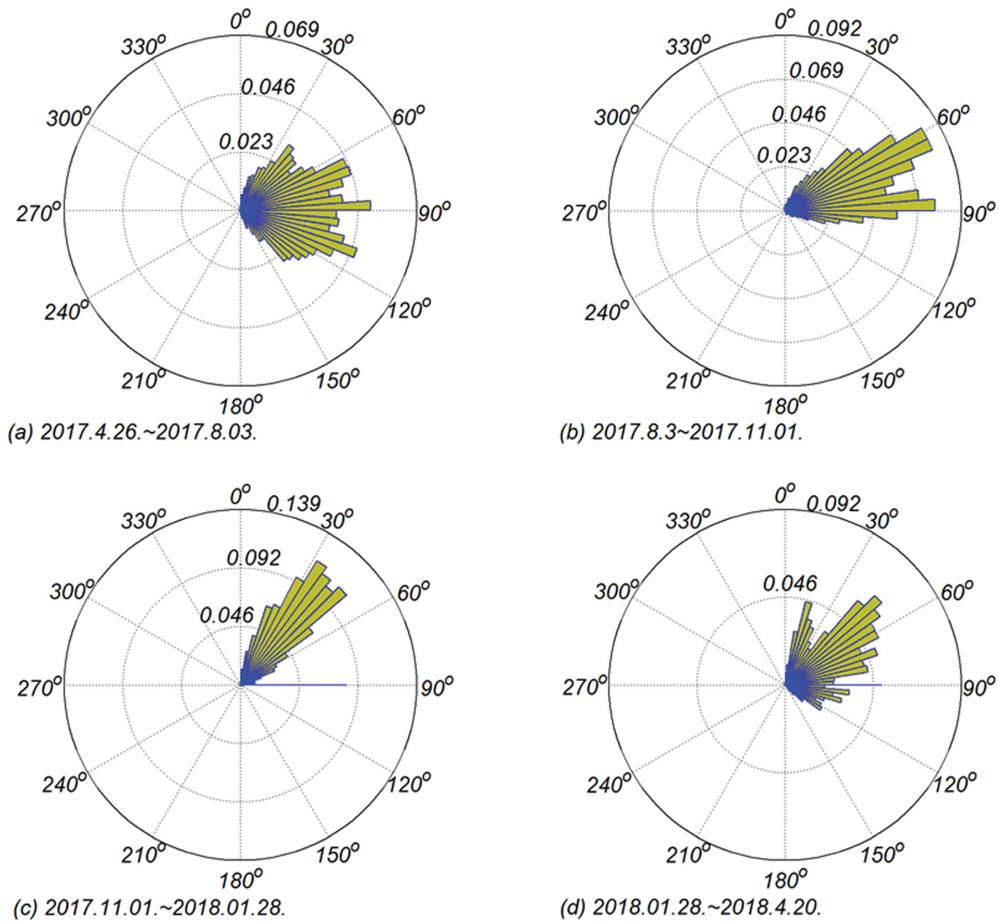


Fig. 9. Quarterly wave rose [modified from Cho et al. (2019)].

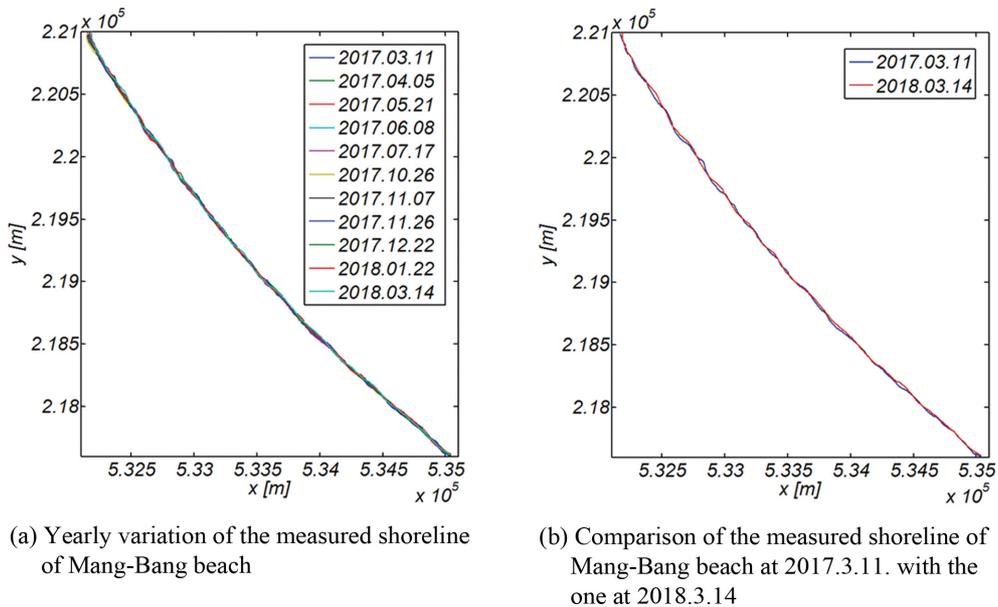


Fig. 10. Yearly variation of the measured shoreline at Mang-Bang beach from 2017.3.11 to 2018.3.14. in the global co-ordinate system.

연은 해안선을 대상으로 beach cusp 분석이 수행되며, 이 과정에서 일 년에 걸친 평균 해안선의 변화 양상과 해변면적 변화추이도 살펴보았다. Beach cusp 해석은 sand wave의 파장을 해안선이 threshold를 상향 통과하는 지점과 바로 후행하

는 지점사이의 거리로, sand wave의 파고는 단위 sand wave 파장 내 최고치와 최저치의 차이로 정의하는 파별 해석법 (wave by wave analysis)을 활용하여 수행하였으며, FFT(Fast Fourier Transformation) 기법을 활용한 스펙트럼 해석도 병

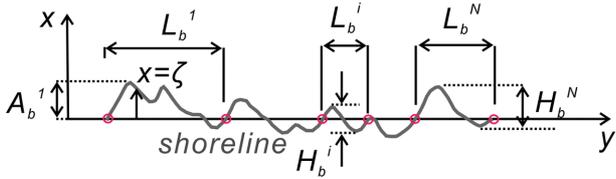


Fig. 11. Definition sketch of the wave length L_b of beach cusp and its associated height A_b .

행하여 수행하였다(Goda, 1985). 이 과정에서 맹방표사 계에 출현하는 beach cusp의 시공을 통한 변화 추이를 가늠하기 위해서는 beach cusp를 정량화 할 필요가 있어, threshold 상향통과 법에서는 특정된 각 beach cusp의 파장 L_b 과 진폭 A_b 을 활용하여 정량화하였다(Fig. 11 참조). 스펙트럼 해석의 경우에는 불규칙 파랑해석에서 빈번하게 활용되는 spectral mean sand wave NO.를 도입하여 정량화하였으며 이를 토대로 sand wave의 융합과 분할주기를 산출하였다(Longuet-Higgins, 1983).

Spectral mean sand wave NO. k_B 는 다음과 같이 정의되며,

$$k_B = \frac{\int k_B S_{\zeta\zeta}(k) dk}{\int S_{\zeta\zeta}(k) dk} \quad (19)$$

여기서 $S_{\zeta\zeta}(k)$ 는 sand wave 스펙트럼을 나타내며, spectral mean sand wave NO. k_B 는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$k_B = \frac{1}{L_B} \quad (20)$$

Fig. 12에는 실측된 해안선을 국지좌표계에서 도시하였으며 (Fig. 5 참조), 이해를 돕기 위해 quadratic 회귀 분석하여 얻은 평균 해안선도 함께 수록하였다. 맹방해빈은 내륙으로 150 m 내외로 굴입된 원호형 해안을 지니며, 매우 역동적인 모양의 beach cusp이 형성되는 것을 알 수 있다(Fig. 12 참조). Fig. 13에는 beach cusp의 일 년에 걸친 진화과정을, Fig. 14에는 de-trending된 해안선을 대상으로 수행된 스펙트럼 해석결과를, Fig. 15에는 비교를 위해 맹방해빈의 일 년에 걸쳐 완성되는 대순환 과정 전 후의 해안선 스펙트럼을 함께 수록하였다. Fig. 16에는 전술한 해안선 스펙트럼으로부터 산출한 spectral mean sand wave NO.의 시계열자료를 도시하였다.

맹방해안에서 형성되는 beach cusp은 다수의 sand wave가 하나로 융합되는 과정과 이렇게 융합된 하나의 커다란 sand wave가 다시 여러 개의 작은 sand wave로 나뉘는 과정이 반복되는 것으로 보이며(Fig. 13 참조), 2017년 3월 11부터

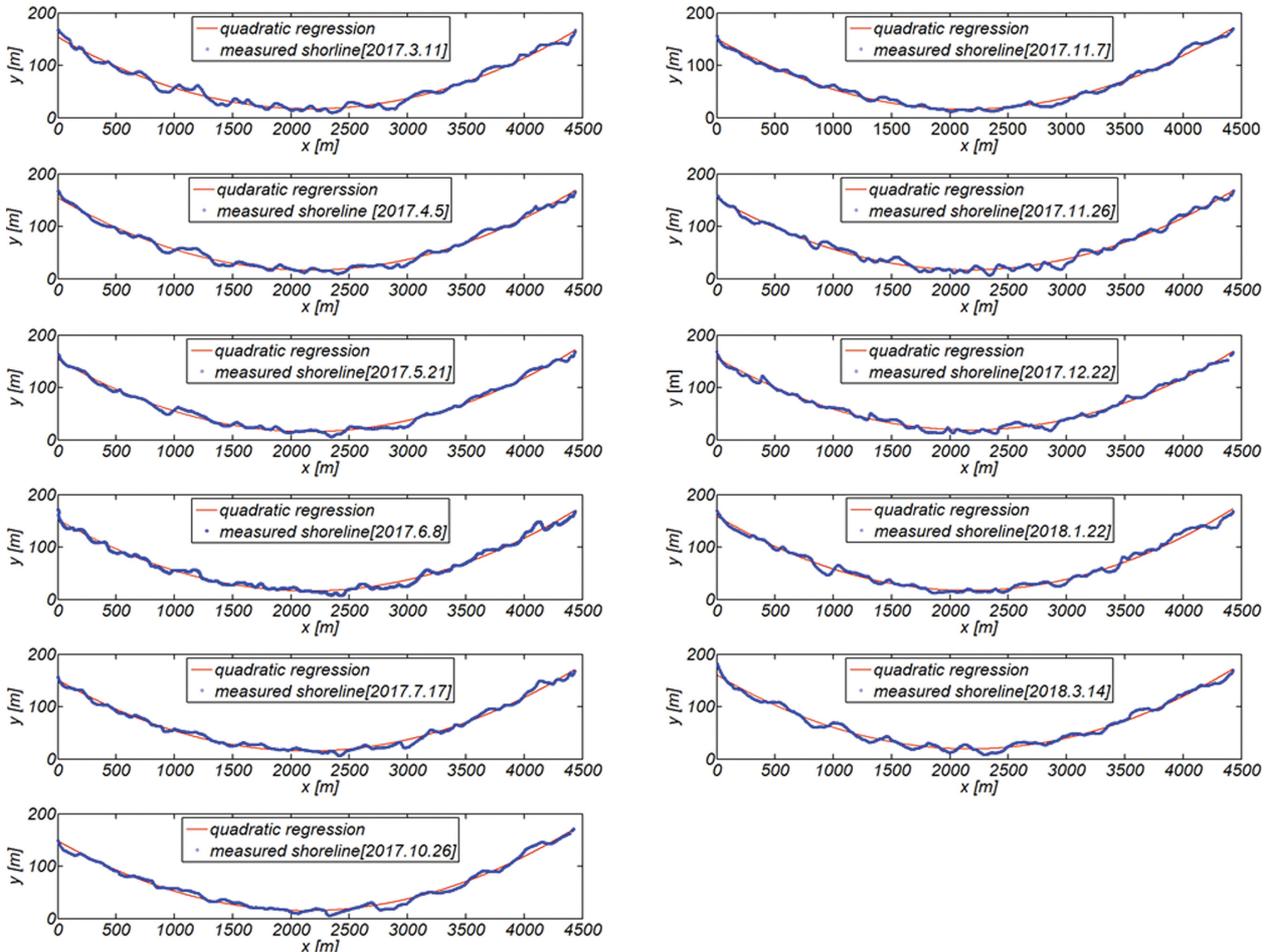


Fig. 12. Evolution of beach cusp along the shore in local co-ordinates from 2017.3.11 to 2018.3.14.

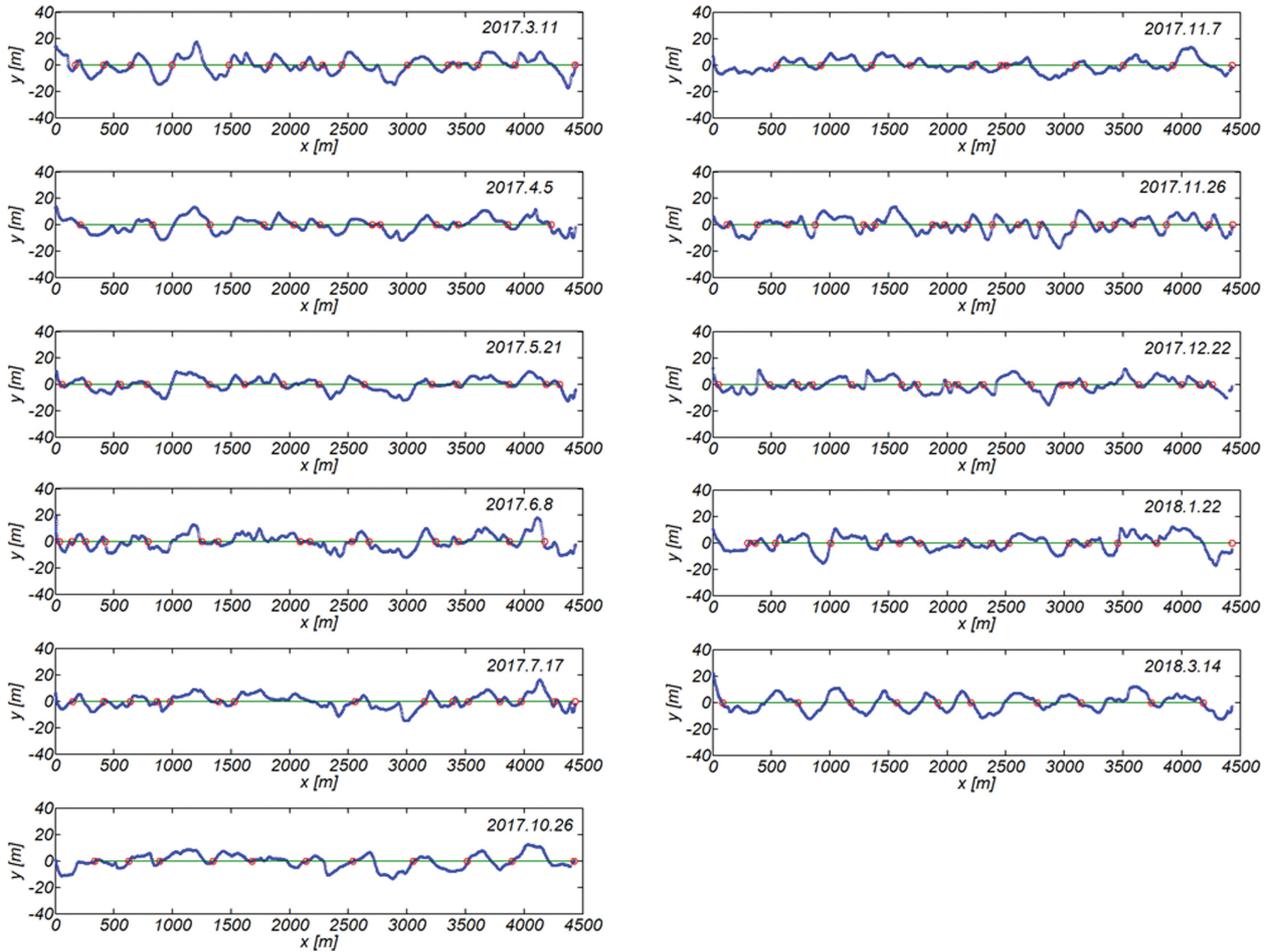


Fig. 13. Evolution of beach cusp along the shore in local co-ordinates from 2017.3.11 to 2018.3.14.

Table 5. List of number of observed beach cusp, mean length of beach cusp μ_{L_b} , mean height of beach cusp μ_{H_b}

Date	No. of sand waves	μ_{L_b} [m]	μ_{H_b} [m]	A_B^{MAX} [m]
2017.03.11	14	304	14.3	17.5
2017.04.05	11	365	12.4	13.3
2017.05.21	13	326	9.7	9.5
2017.06.08	14	295	11.4	17.9
2017.07.17	14	306	10.8	16.2
2017.10.26	10	371	10.9	12.4
2017.11.07	10	388	10.9	13.4
2017.11.26	18	233	12.5	13.7
2017.12.22	17	247	9.7	11.7
2018.01.22	13	294	11.4	12.2
2018.03.14	9	455	16.6	12.2

2018년 3월 14일 사이에 실측된 각 해안선을 threshold crossing method로 전수 조사하여 산출한 beach cusp 파장과 진폭 분포는 Table 5에 정리하였다. Spectral mean sand wave NO.의 시계열자료(Fig. 16 참조)로부터 sand wave의 융합과 분할이 반복되는 주기를 산출하는 경우 beach cusp의 대순환과정은 일 년에 두 번에 걸쳐 진행되는 것을 확인할 수 있으며, 년 최대 고파랑이 연이어 내습한 10월말 이후(Fig. 7 참

조)에 실측된 해안선의 경우 고파랑에 의한 대규모 침식으로 해변이 재정렬 되는 과정에서 역동적인 모양의 beach cusp은 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

총 11회에 걸쳐 시행된 해안선 관측결과에서 관측된 특기할 만한 수리현상을 정리하면 다음과 같다:

A. 2017.3.11.~2017.4.5.

비교적 온화한 겨울성 장주기 파랑이 지배적인 2017.3.11.부터 2017.4.5. 사이에 소규모 beach cusp 들이 융합하여 커다란 beach cusp으로 성장하는 것을 확연하게 관측할 수 있다. 전술한 융합과정에서 beach cusp의 진폭 A_b 에는 큰 변화가 없으나, 융합으로 인해 beach cusp의 파장 L_b 는 증가하는 것으로 보인다.

B. 2017.4.5.~2017.5.21.

융합으로 형성된 일 부 대규모 beach cusp은 다시 소규모 beach cusp으로 나누어지는 과정을 거치는 것을 확인할 수 있으며, 맹방 해안 남쪽에 형성된 소규모 beach cusp은 융합으로 상대적으로 큰 beach cusp으로 진화하고 있는 것을 알 수 있다.

C. 2017.5.21.~2017.6.8.

융합으로 형성된 대부분의 큰 beach cusp은 다시 소규모

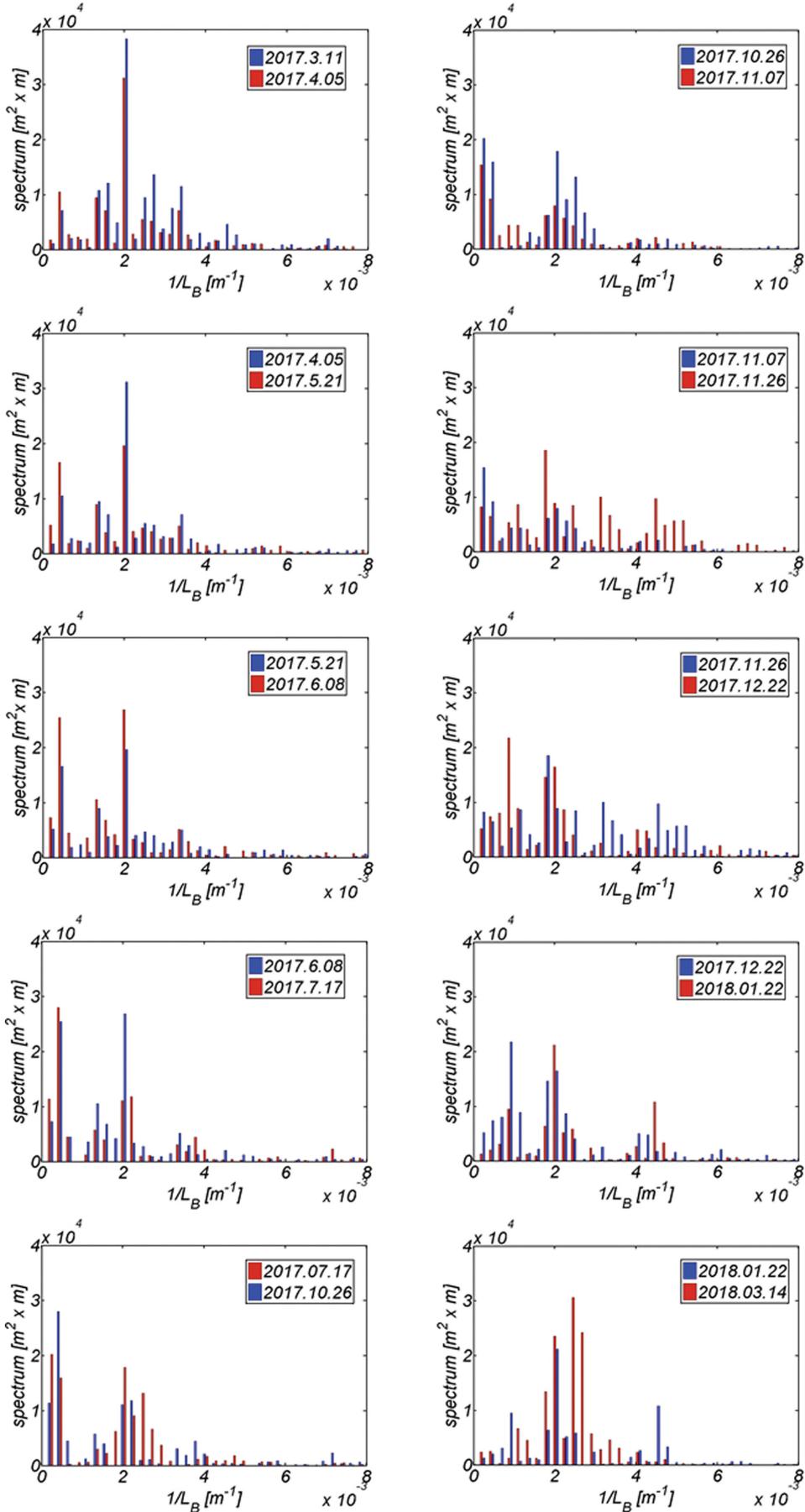


Fig. 14. Monthly variation of beach cusp spectrum $S_{cc}(k)$ from 2017.3.11.~2018.3.14.

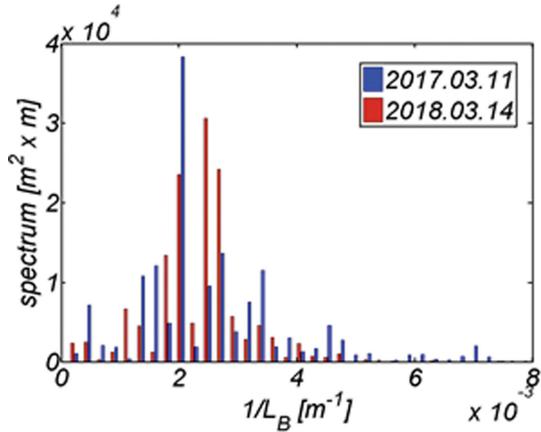


Fig. 15. Yearly variation of beach cusp spectrum $S_{cc}(k)$ from 2017.3.11.~2018.3.14.

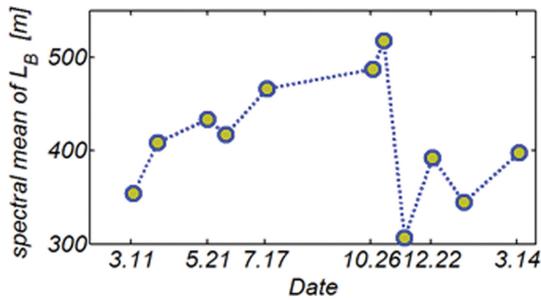


Fig. 16. Time series of spectral mean sand wave NO. k_B from 2017.3.11.~2018.3.14.

beach cusp으로 나누어지는 과정을 거치는 것을 보이며, 맹방 해안 남쪽 일부 구간에서는 융합으로 형성된 커다란 beach cusp이 관측된다.

D. 2017.6.8.~2017.7.17.

일부 구간에서는 융합이 나머지 구간에서는 분할이 혼재하는 것으로 보인다.

E. 2017.7.17.~2017.10.26.

Plunging 형태의 쇄파가 지배적인 해양환경으로 인해 역동적인 모양의 beach cusp은 대부분 소실되었다.

F. 2017.10.26.~2017.11.07.

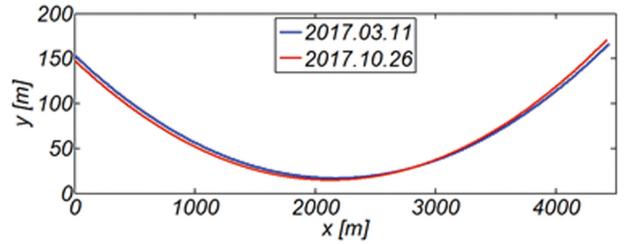
연 최대 고파랑이 연이어 내습한 11월 7일에 실측된 해안선의 경우 선행 고파랑에 의한 대규모 침식으로 해빈이 재정렬 되는 과정에서 매우 역동적인 모양의 beach cusp은 대부분 사라졌다.

G. 2017.11.7.~2017.11.26.

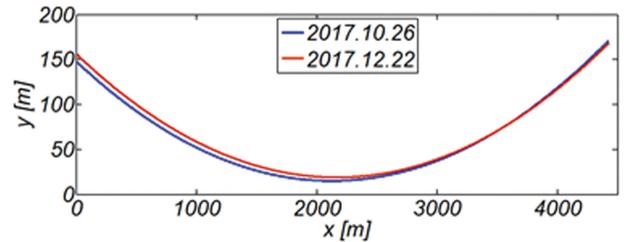
장주기의 너울성 파랑이 우월한 해양환경으로 인해 가장 역동적인 모양의 beach cusp이 다시 복원되는 과정으로 보인다.

3.3 맹방해빈 면적 변화 추이

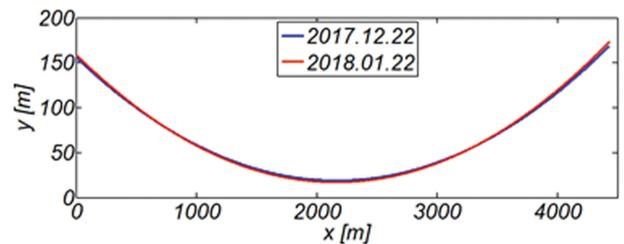
Fig. 17에는 국지 좌표계에서 quadratic 회귀 분석하여 얻은 평균 해안선의 계절별 변화를 정리하였으며, Fig. 18에는



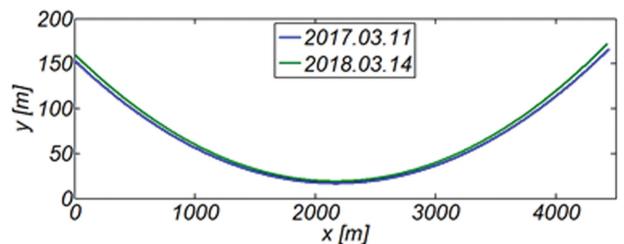
(a) 2017.3.11.~2017.10.26



(b) 2017.10.26.~2017.12.22



(c) 2017.12.22.~2018.1.22



(d) 2017.3.11.~2018.3.14

Fig. 17. Seasonal and yearly variation of measured shore line of Mang-Bang beach in local coordinates (see Fig. 5).

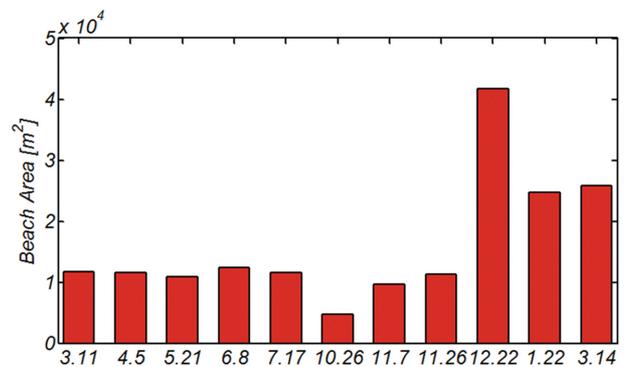


Fig. 18. Variation of beach area of Mang-Bang from 2017.3.11. to 2018.3.14.

맹방 해빈면적의 일 년에 걸친 변화추이를 정리하였다. 10월 말에 연이어 발생한 연 최대 고파랑으로 인해 해빈면적은 10

월 26일에 6,813 m² 내외로 일시적으로 감소하나, 바람이 잦아들고 다시 너울이 지배적인 해양환경으로 전환되는 11월 26일에는 해변면적은 대부분 복원되었다(Fig. 18 참조). 해변 대순환 과정이 완성되는 일 년을 기준으로 하는 경우 해변면적은 14,142 m² 정도 증가하여 맹방표사계가 침식성이라는 기존의 평가는 수정 되어야 할 것으로 판단된다.

여기서 한 가지 특기할 만한 현상은 11월 26부터 12월 22일 사이에 30,345 m² 내외로 급속하게 증가한 해변면적으로(Fig. 17, 18 참조) 보인다. 이렇게 단기간에 걸쳐 급속하게 증가한 해변면적은 상당히 예외적인 현상으로 상당한 논의가 필요해 보이나, 11월 26부터 12월 22일 사이의 맹방해안으로 내습한 파랑의 성격에서 실마리를 찾을 수 있을 듯하다(Fig. 7, 8, 9 참조). 전술한 기간은 유의파고 H_s 가 2 m 미만의 온화한 장주기 너울이 지배적이며, 대부분의 파랑이 영의 영각으로 맹방해안으로 진입된다(Fig. 7, 8, 9 참조). 전술한 파랑조건은 11월 26부터 12월 22일 사이의 주 표사 이송모드가 횡단 표사라는 것을 의미하는 것으로 자연 해변의 자기치유능력이 횡단 표사를 통해 구현된다는 사실을 상기하면 전술한 해변면적의 급속한 증가는 영의 영각으로 진입하는 파랑의 경계층 streaming에 의한 해안방향으로의 표사 이송이 누적되어 발생한 것으로 판단된다(Cho, 2019).

4. 결 론

파랑관측 자료(Cho and Kim, 2019)와 실측된 해안선 위치(Cho et al., 2019)를 활용하여 맹방해안에 형성되는 beach cusp의 일 년에 걸친 대순환 과정과 계절별 특성을 포획모드 Edge waves와 beach cusp의 인과 관계를 중심으로 살펴보았다.

맹방해안은 내륙으로 150 m 내외로 굴입된 원호형 해안을 지니며, 매우 역동적인 모양의 beach cusp이 형성되는 것을 확인하였다. 맹방해안은 해안선으로부터 60~80 m 이격된 지점까지 경사가 1/10 내외인 급경사의 전빈이 포진하며 이 후 수심이 5 m 내외인 간조단구(low tide terrace)가 이격거리가 200 m인 지점까지 길게 이어진다. 따라서 Edge waves가 포획되는 전빈 폭은 60 m에서부터 80 m 사이로 보이며, 이러한 전빈 폭으로부터 맹방해안에 출현할 수 있는 포획모드 Edge waves의 주기와 포획모드 Edge waves와 resonance quartet을 구성하는 입사파 주기를 가늠해 볼 수 있으며, 추정결과 포획모드 Edge waves를 야기하는 입사파는 주기가 38.9 s 내외인 외중력파로 판단된다. Beach cusp의 주 생성기작으로 알려진 Edge waves가 출현하기 위해서는 먼저 해안에 이웃한 전빈 해역에 전빈에서 진행되는 상당한 반사로 인해 정상파가 형성되어야 하며 이를 위해서는 surging 형태의 쇄파가 선행되어야 한다. 전술한 surging 형태의 쇄파는 비교적 완만한 너울성 장주기 파랑이 우월한 4월 말에서부터 7월 말 사이에 집중적으로 발생하며, 전술한 너울성 장주기 파랑은 맹방해안에 가장 역동적인 beach cusp이라는 커다란 흔

적을 남기는 것으로 추정된다. Beach cusp 분석을 위해 먼저 총 11회에 걸쳐 실측된 해안선을 국지 좌표계로 mapping하고 mapping된 각각의 해안선을 quadratic 회귀 분석하여 평균 해안선을 도출하였다. 이어 이렇게 찾아낸 평균 해안선을 mapping된 각각의 해안선으로부터 유리하여(de-trending) 얻은 해안선을 대상으로 beach cusp 분석을 수행하였다. 이 과정에서 일 년에 걸친 평균 해안선의 변화 양상과 해변면적 변화추이도 살펴보았다.

Beach cusp 해석은 sand wave의 파장을 threshold를 상향 통과하는 지점과 바로 후행하는 지점사이의 거리로, sand wave의 파고는 단위 sand wave 파장 내 최고치와 최저치의 차이로 정의하는 파별 해석법(wave by wave analysis)을 활용하여 수행하였으며, FFT(Fast Fourier Transformation)을 활용한 스펙트럼 해석도 병행하여 수행하였다. 이 과정에서 맹방표사 계에 출현하는 beach cusp의 시공을 통한 변화 추이를 가늠하기 위해 threshold 상향통과 법으로 특정된 각 beach cusp의 파장과 진폭을 활용하여 beach cusp을 정량화하였으며, 스펙트럼 해석의 경우에는 spectral mean sand wave NO.를 도입하여 정량화하였다.

해석결과 맹방해안에서 형성되는 beach cusp은 다수의 sand wave가 하나로 융합되는 과정과 이렇게 융합된 하나의 커다란 sand wave가 다시 여러 개의 작은 sand wave로 나뉘는 과정이 반복되는 것을 관측할 수 있었으며, 년 최대 고파랑이 연이어 내습한 10월말 이후에 실측된 해안선의 경우 고파랑에 의한 대규모 침식으로 해변이 재 정열 되는 과정에서 역동적인 모양의 beach cusp은 소멸되었다. Spectral mean sand wave NO.의 시계열자료로부터 sand wave의 융합과 분할이 반복되는 주기를 산출하는 경우 beach cusp의 대순환과정은 일 년에 두 번에 걸쳐 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 해변면적의 경우 10월 말에 연이어 발생한 년 최대 고파랑으로 인해 해변면적은 10월 26일에 6,813 m² 내외로 일시적으로 감소하나, 바람이 잦아들고 다시 너울이 지배적인 해양환경으로 전환되는 11월 26일에는 해변면적은 대부분 복원되었다. 해변 대순환 과정이 완성되는 일 년을 기준으로 해변면적은 14,142 m² 정도 증가하여 맹방표사계가 침식성이라는 기존의 평가는 수정 되어야 할 것으로 판단되며, 맹방해안 남단과 북단에서는 18 m, 맹방 해안 중앙부에서는 2.4 m 내외로 전진하였다. 여기서 한 가지 특기할 만한 현상은 11월 26부터 12월 22일 사이에 30,345 m² 내외로 급속하게 증가한 해변면적으로 보인다. 이렇게 단기간에 걸쳐 급속하게 증가한 해변면적은 상당히 예외적인 현상으로 상당한 논의가 필요해 보이나, 11월 26부터 12월 22일 사이의 맹방해안으로 내습한 파랑의 성격에서 급속한 증가를 설명할 수 있는 논리적 근거를 찾을 수 있을 듯하다.

전술한 기간은 유의파고 H_s 가 2 m 미만의 온화한 장주기 너울이 지배적이며, 대부분의 파랑이 영의 영각에 가깝게 맹방해안으로 내습한다(Fig. 4(c) 참조). 전술한 파랑조건은 11

월 26부터 12월 22일 사이의 주 표사 이송모드가 횡단 표사라는 것을 의미하며 자연 해빈의 자기 치유능력이 횡단 표사를 통해 구현된다는 사실을 상기하면 진술한 해빈면적의 급속한 증가는 영의 영각에 가깝게 진입하는 파랑의 경계층 streaming에 의해 해안방향으로 회귀하는 표사가 누적되어 발생한 것으로 판단된다.

References

Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1965). Handbook of mathematical functions, Dover, Mineola, NY.

Cho, Y.J. (2019). Numerical analysis of the beach stabilization effect of an asymmetric ripple mat. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(4), 209-220.

Cho, Y.J. and Bae, J.H. (2019). On the feasibility of freak wave formation within the harbor due to the presence of Infra-gravity waves of bound mode underlying the ever-present swells. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(1), 17-27.

Cho, Y.J. and Kim, I.H. (2019). Preliminary study on the development of platform for the selection of an optimal beach stabilization measures against the beach erosion-centering on the yearly sediment budget of the Mang-Bang beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(1), 28-39.

Cho, Y.J., Kim, I.H. and Cho, Y.J. (2019). Numerical analysis of the grand circulation process of Mang-Bang beach- centered on the shoreline change from 2017. 4. 26 to 2018. 4. 20. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(3), 101-114.

Dodd, N., Stoker, A.M., Calvete, D. and Sriariyawat, A. (2008). On beach cusp formation. J. Fluid Mech., 597, 145-169.

Eckart, C. (1951). Surface waves on water of variable depth, Wave Report 100, University of California, Scripps Institution of

Oceanography, Ref No 51-12, 99 pp.

Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press.

Guza, R.T. (1974). Excitation of edge waves and their role in the formation of beach cusps, University of California, San diego, Ph.D., 1974 Oceanography.

Hasselmann, K. (1967). A criterion for nonlinear wave stability. Journal of Fluid Mechanics, 30(4), 737-739.

Longuet-Higgins, M.S. (1983). On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field. Proc. Roy. Soc. of London, 389(A), 241-258.

Phillips, O.M. (1980). The Dynamics of the Upper Ocean. 2nd edition. Cambridge, Cambridge University Press.

Appendix A.

Table A1. List of coefficients p_i from quadratic regression [$p_1x^2 + p_2x + p_3$].

Date	p_1	p_2	p_3
2017.03.11	0.00002902	-0.126042	153.48348
2017.04.05	0.00002952	-0.127808	154.41162
2017.05.21	0.00002992	-0.128590	153.67191
2017.06.08	0.00002949	-0.126907	152.61330
2017.07.17	0.00002963	-0.126962	151.20560
2017.10.26	0.00002951	-0.125457	148.26483
2017.11.07	0.00002952	-0.126054	150.57584
2017.11.26	0.00002936	-0.126741	153.51692
2017.12.22	0.00002929	-0.126975	156.47872
2018.01.22	0.00003040	-0.131467	159.14908
2018.03.14	0.00003002	-0.130311	160.66421

Received 7 September, 2019

Revised 15 October, 2019

Accepted 21 October, 2019