

경험고유함수를 이용한 후정해수욕장 단기 모래 이동 분석 Short-term Sand Movement Analysis in Hujeong Beach using Empirical Orthogonal Functions

천세현* · 서경덕** · 안경모***

Se-Hyeon Cheon*, Kyung-Duck Suh** and Kyungmo Ahn***

요 지: 후정해수욕장의 모래 이동을 분석하기 위해 경험고유함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석법을 적용하였다. EOF 분석을 위해 2009년 6월부터 2010년 5월까지 13개 기선에 대해서 총 5회 실시된 후정해수욕장의 단면 관측값이 사용되었다. 13개 단면 분석결과 사이의 시간적, 물리적 일관성을 확보하기 위해 13개 기선 모두를 하나로 통합하고 이를 사용해 EOF 분석을 수행하였다. 분석결과 첫 번째 고유함수는 평균해빈 지형을 나타내었으며 두 번째와 세 번째 고유함수의 경우 해빈의 자연변동성과 파랑에 의해 발생한 횡방향 모래이동을 각각 나타내었다. 네 번째와 다섯 번째 고유함수의 경우 특별한 연관성을 발견할 수 없었다. 결론적으로 후정해수욕장의 모래 이동에 영향을 미치는 요인은 크기 순으로 자연변동성과 파랑에 의한 횡방향 모래이동으로 분석되었다.

핵심용어: 경험고유함수, EOF, 모래이동, 해빈변화, 단면변화, 후정해수욕장

Abstract : EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis is applied to investigate the sand movement in Hujeong Beach. For the analysis, the profile data which were observed five times from June 2009 to May 2010 along the 13 baselines were used. To secure the temporal and physical consistency among the 13 profile data, the 13 profile data were combined into one data and using this data the EOF analysis was performed. According to the analysis, the first EOF is related with the mean topography and the second EOF represents the natural variation of sediment migration and the third EOF is related with the along-shore sediment transport arising from storm. The remaining EOFs show no special relation with wave conditions. In conclusion the main factors which are having great effects on Hujeong Beach's sand movement are analyzed as natural variation and along-shore sediment transport owing the wave conditions.

Keywords : empirical orthogonal function, EOF, sand movement, beach change, profile change, Hujeong beach

1. 서 론

해빈 침식은 전세계적으로 발생하고 있는 문제로 생태계와 자연 경관을 훼손할 뿐 아니라 해수욕장의 전면 경사를 급하게 만든다. 이러한 부작용들은 해빈의 경제적 가치를 하락시키며 이에 따라 해빈 침식을 완화하고 유실된 해빈을 복구하기 위한 지역 사회 또는 중앙 정부 차원의 노력이 다양하게 시도되고 있다. 그러나 해빈 유실은 매우 다양한 원인에 의해서 발생하는 현상으로 정확한 원인을 진단하는 것은 매우 어려운 문제다.

현재까지 모래 이동을 정량적 또는 정성적으로 분석하기 위해 여러 가지 접근 방법이 시도되어 왔다. 해빈 지형 관측 자

료로부터 해빈 모래의 이동을 분석하기 위한 방법으로는 모래 부피변화 분석법(Dean and Dalrymple, 2002), 모래수지 분석법(Dean and Dalrymple, 2002), 경험고유함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석법(Winant et al., 1975), Even-Odd 분석법(Berek and Dean, 1982), CPCA(Complex Principal Component Analysis) 분석법(Liang and Seymour, 1991) 등이 있다. 그러나 다양한 접근 방법들이 시도되어 왔음에도 불구하고 해빈 모래 이동의 유형과 원인을 정확히 분석할 수 있는 방법에 대한 합의는 아직 없다.

본 연구에서 적용한 EOF 분석의 경우 해안선 변형과 해빈 단면변형 분석을 위해 도입된 사례가 있다(Winant et al., 1975; Liang and Seymour, 1991). 그러나 이전 연구들에서

*서울대학교 건설환경공학부 (Corresponding author : Se-Hyeon Cheon, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea, Tel:+82-2-880-8836, Fax:+82-2-873-2684, shcheon95@gmail.com)

**서울대학교 건설환경공학부 (Department of Civil and Environmental Engineering & Engineering Research Institute, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea)

***한동대학교 공간환경시스템공학부 (School of Spatial Environmental System Engineering, Handong Global University, Pohang, Kyeongbuk, 791-708, Korea)

사용된 EOF 분석의 경우 대부분 해안선이나 해빈 단면변화를 1차원으로 분석하고 있으며(Winant et al., 1975; Aubrey, 1979; Clarke and Eliot, 1982; Dick and Dalrymple, 1984; Clarke and Eliot, 1988; Pruszek, 1993; Bosma and Dalrymple, 1996; Muñoz-Pérez et al., 2001) 2차원 EOF 분석을 수행한 연구(Larson et al., 1999)는 그 수가 매우 작을 뿐 아니라 분석된 고유함수와 파랑을 직접적으로 연관시켜 모래 이동을 분석한 연구는 수행된 적이 없다. 1차원으로 분석된 해빈 단면의 경우 각 기선(baseline)에 대해 EOF 분석을 각각 수행함으로써 기선별로 분석된 결과가 시간적, 물리적 일관성을 가지지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 해빈 단면에 대한 EOF 분석을 수행할 경우 모래의 종방향 이동은 분석할 수 있지만 횡방향 이동에 대한 분석은 수행하기 어려워 실제로 해빈 전체에서 모래 이동을 분석하기에는 부적절한 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 시간적, 물리적으로 일관된 EOF 분석을 수행하기 위해 해빈 단면 관측자료 전체를 이용해 EOF 분석을 수행하고 이를 파랑의 특성과 연계하여 해석해 후정해수욕장의 모래 이동을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 연구방법 개요

본 장에서는 EOF 분석에 사용된 후정해수욕장 단면 관측자료와 파랑 관측 자료에 대해서 간략히 설명하였으며 EOF 분석법에 대한 이론적 배경과 분석을 위한 자료처리 과정에 대해 기술하였다.

2.2 연구대상 지역

EOF 분석법을 적용할 대상 지역은 경상북도 울진군에 위치한 후정해수욕장으로 해빈 유실이 발생하고 있는 지역이다. 후정해수욕장 모래의 평균 입경은 0.4 mm이며 해빈의 경사각이 급한 지형적 특성을 가지고 있다. 동해안의 다른 지역과 마찬가지로 조차는 0.10~0.30 m로 작고 해빈의 양 끝은 북쪽의 울진 원자력 발전소의 냉각수 배출 도류제와 남쪽의 암초지대로 막혀있으며 해안의 법선 방위각은 37.33°이다(Fig. 1). 후정천은 후정해수욕장의 모래 공급원으로 해양과학기술원 동해연구소의 북측 해빈에서 바다와 만나고 있으나 홍수기를 제외한 거의 모든 기간 동안 폐색되어 있어 해안선을 분리시키고 있지는 않다. 조차의 크기가 매우 작기 때문에 조석에 의

한 모래 이동은 거의 없는 것으로 판단해 관측 시 조석의 영향은 고려하지 않았다.

2.3 파랑 관측

파랑은 후정해수욕장 전면 해상 수심 약 23미터 지점에서 2009년 5월 27일부터 2010년 7월 15일까지 관측되었으며 수압식 파고계(PUV)와 초음파식 파고계(ADCP, AWAC)를 교대로 사용하였다(Table 1, Fig. 1). 관측 파고를 검증하고 결측 자료의 처리를 위해 해양과학기술원 동해연구소 전면 해상 약 50미터 수심에 설치된 부이형 파고계(Buoy; 해양과학기술원 운영)의 관측값을 참고자료로 사용하였다(Fig. 1).

관측된 파랑 자료의 파고, 주기, 파향의 시계열 자료는 Fig. 2와 같으며 파향별 파고분포와 파향의 분포는 Fig. 3과 같다. 관측된 파랑을 분석한 결과 주파향은 NE 방향으로 분석되었으며 4 m 이상의 고파랑의 경우 NNE와 NE 방향의 빈도가 비슷한 것으로 분석되었다(Figs. 2-3).

2.4 파랑 특성

파랑 자료를 계절별로 통계 분석한 결과 겨울과 봄에는 유의 파고의 평균과 표준편차가 동시에 크고 가을의 경우 유의파고의 평균은 겨울과 봄에 비해 작으나 표준편차가 큰 특징을 보인다(Table 2). 여름의 경우 평균파고와 표준편차가 같이 작아 매우 잔잔한 특성을 보이고 있다. 이는 후정해수욕장에 내습하는

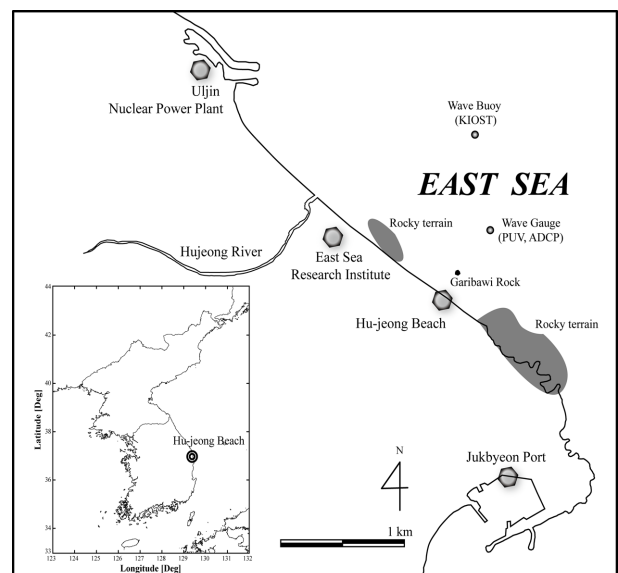


Fig. 1. Topographic features of Hujong Beach.

Table 1. Wave Observation period

Observation Order	Observation Period	Gauge Type	Observation Order	Observation Period	Gauge Type
1 st	2009.05.27~2009.06.25	ADCP	5 th	2009.10.28~2009.12.03	ADCP
2 nd	2009.06.25~2009.08.14	PUV	6 th	2009.12.03~2010.01.26	BUOY
3 rd	2009.08.14~2009.09.16	ADCP	7 th	2010.01.26~2010.03.17	ADCP
4 th	2009.09.16~2009.10.28	PUV	8 th	2010.03.17~2010.07.15	AWAC

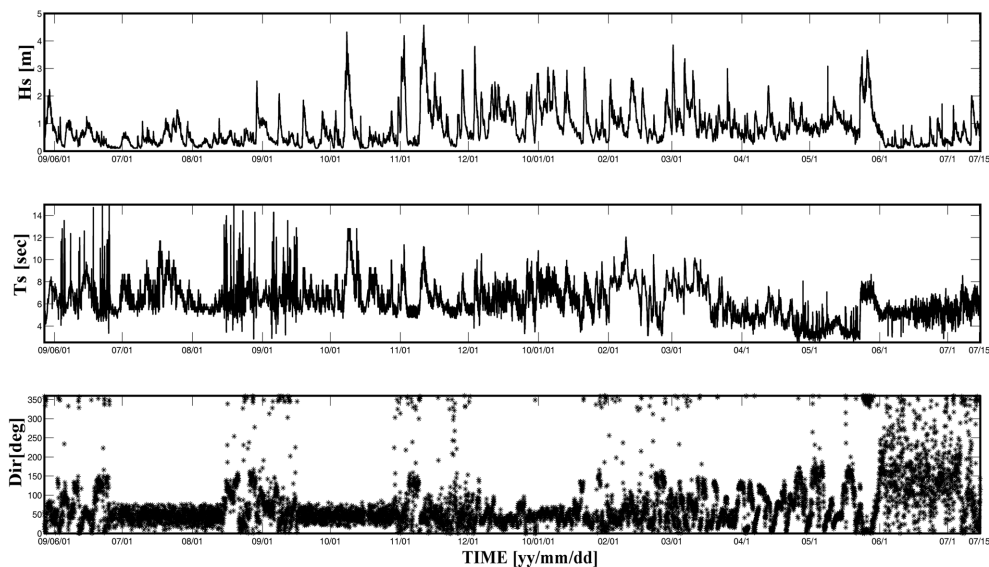


Fig. 2. Wave data time series.

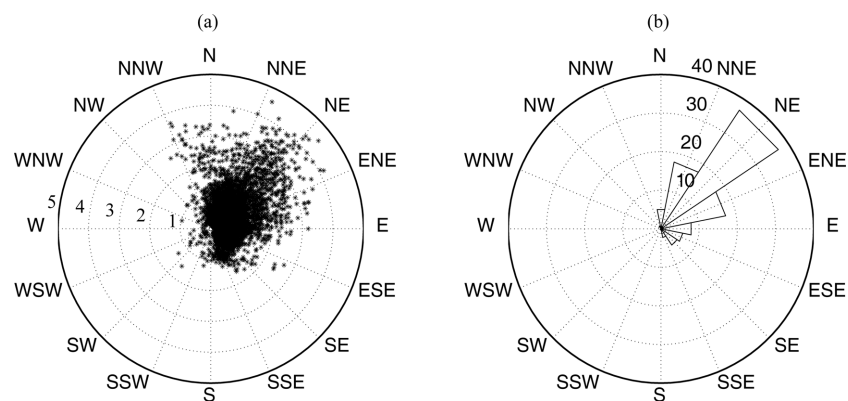


Fig. 3. Polar plot of significant wave height (a); Distribution of wave direction (b).

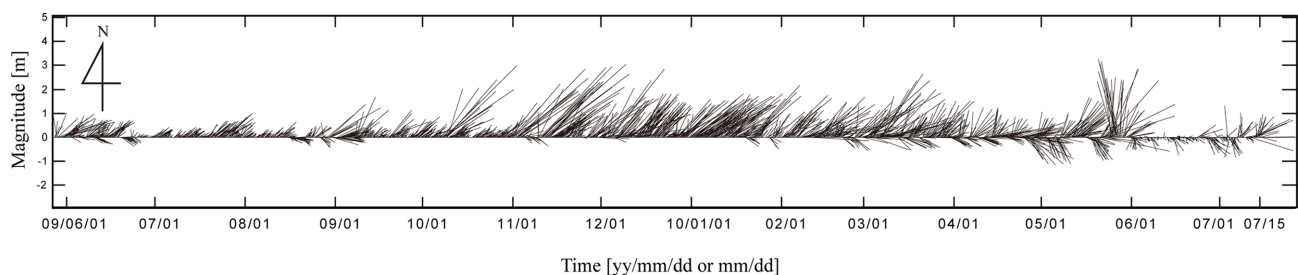


Fig. 4. Wave Vectors.

Table 2. Statistical properties of wave for different season

Season	Summer (6,7,8)	Fall (9,10,11)	Winter (12,1,2)	Spring (3,4,5)
$\overline{H_s}$ [m]	0.51	0.86	1.19	1.09
σ_{H_s} [m]	0.35	0.84	0.63	0.56
Mean Dir. [deg]	34.2	40.3	41.0	23.2
Profile Observation	1 st	2 nd , 3 rd		4 th , 5 th

Note: $\overline{H_s}$ = average value of significant wave height, σ_{H_s} = standard deviation of significant wave height

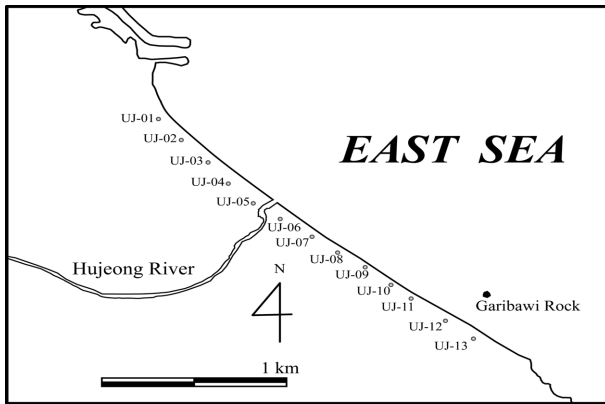
파랑의 파고가 겨울과 봄에 가장 크고 여름에는 전반적으로 낮으며 가을의 경우 주로 폭풍으로 인해 파고의 크기가 갑자기 커지는 특성을 설명하고 있다. 파랑 벡터도의 경우 파랑의 크기와 방향을 시계열로 나타낸 것으로 각 시간대별로 직선의 크기와 방향이 파고의 크기와 방향을 나타낸다. 후정해수욕장에 내습하는 파랑의 파고와 파향을 이용한 파랑 벡터도는 Fig. 4와 같다.

2.5 단면 관측

후정해수욕장 단면 측량은 파고 관측 기간 중 선박과 수심 측량장비, RTK(Real-Time Kinematic) GPS 등을 이용하여

Table 3. Observation schedule

Observations	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Date	2009.06.08.	2009.09.04.	2009.10.16.	2010.04.02.	2010.05.20.

**Fig. 5.** Base points of profile observations.

해안선의 법선 방향으로 실시되었으며 총 5회 실시되었다. 특히 세 번째 관측의 경우 직전에 발생한 폭풍에 의한 해빈 변화를 관측하기 위해 실시되었다. 단면 관측의 자세한 일정과 측량 기준점은 각각 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다.

2.6 EOF 분석법

EOF 분석법은 PCA(Principal Component Analysis) 분석법이라고도 알려진 통계 분석방법으로 시간에 따라 변화하는 공간자료로부터 서로 독립인 성분(경험고유함수 또는 EOF)을 분산이 큰 순서로 추출해내는 방법이다. 시간과 공간으로 이루어진 연속자료(시·공간 자료)를 시간과 공간 각각의 함수로 분리해 내는 분석방법으로 수학적으로는 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$T(r, t) = \sum_n T_n(t) \phi_n(r) \quad (1)$$

여기서, $T(r, t)$ = 시간-공간 원본자료, $T_n(t)$ = n 번째 EOF의 진폭 시계열 자료(PC time series 또는 PCt), 그리고 $\phi_n(r)$ = n 번째 경험고유함수(EOF 또는 Loading Vector 또는 LV)이다.

Eq. (1)의 과정은 관측자료의 공분산행렬(covariance matrix)의 고유값(eigen value)을 산정하고 이를 이용해 경험고유함수 $\phi_n(r)$ 을 계산하는 과정으로 일반적으로 사용되는 과정이다. 고유함수를 이용해 PCt를 산정하는 과정은 Eq. (2)와 같으며 이는 산정된 $\phi_n(r)$ 을 원 자료에 내적시켜 PCt를 계산하는 것을 의미한다.

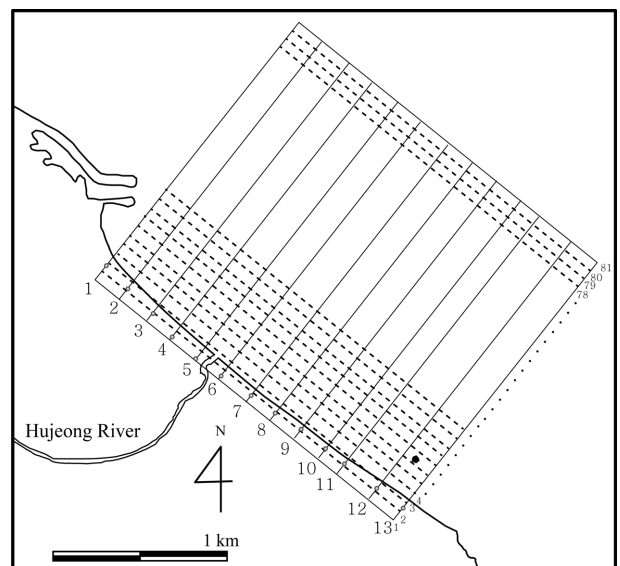
$$\begin{aligned} T(r, t) \cdot \phi_m(r) &= \sum_{n=1}^N T_n(t) \phi_n(r) \cdot \phi_m(r) \\ &= \sum_{n=1}^N T_n(t) \delta_{nm} = T_m(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, δ_{nm} = Kronecker delta이다.

EOF 분석법이 해안공학에 도입된 초기에는 주로 해빈 단면의 변화를 분석하는데 이용되었다(Winant et al., 1975; Aubrey, 1978; Aubrey, 1979; Dick and Dalrymple, 1984). 이후 해안선 변화를 분석하기 위해 발전된 EOF 분석법인 CPCA법으로 적용되었다(Liang and Seymour, 1991; Medina et al., 1992; Bosma and Dalrymple, 1996). 국내에서는 (Cheon et al., 2013) 이 EOF 분석법을 이용하여 해빈 단면과 해안선의 변화를 분석한 사례가 있다. 그러나 위의 선행 연구들은 1차원 분석자료를 이용해 지형 변화를 분석한 사례가 대부분으로 해빈 전 지역에서의 모래 이동을 분석하기 힘들뿐 아니라 파랑, LV, 그리고 PCt를 서로 연관해 분석하지 않아 파랑 조건에 따른 모래 이동을 제대로 설명하지 못하고 있다.

2.7 관측값의 처리

13개 관측기선(survey baseline)에 대해 측정된 해빈 단면을 동시에 사용해 EOF 분석을 수행하기 위해 각 기선의 길이와 기선별 관측지점의 개수가 동일해야 한다. 각 기선에서 해안선의 법선 방향으로 평균해수면을 기준으로 관측된 표고값을 10미터 간격으로 800 미터까지 나누어 총 81개 지점으로 정리하였다. 격자점과 관측지점이 다른 경우 선형보간법(linear interpolation)을 이용하여 격자점에서의 값을 산정하였으며 각 관측마다 81행 13열의 행렬 데이터가 생성된다(Fig. 6). EOF 분석 시에는 이 행렬을 행벡터(row vector)로 변환하여 크기가 5×1053 인 행렬을 생성하여 EOF 분석을 수행하였다. 생성된 행렬을 이용하여 해빈지형을 등고선으로 나타내면 Fig. 7과 같다.

**Fig. 6.** Generation of Profile Matrix.

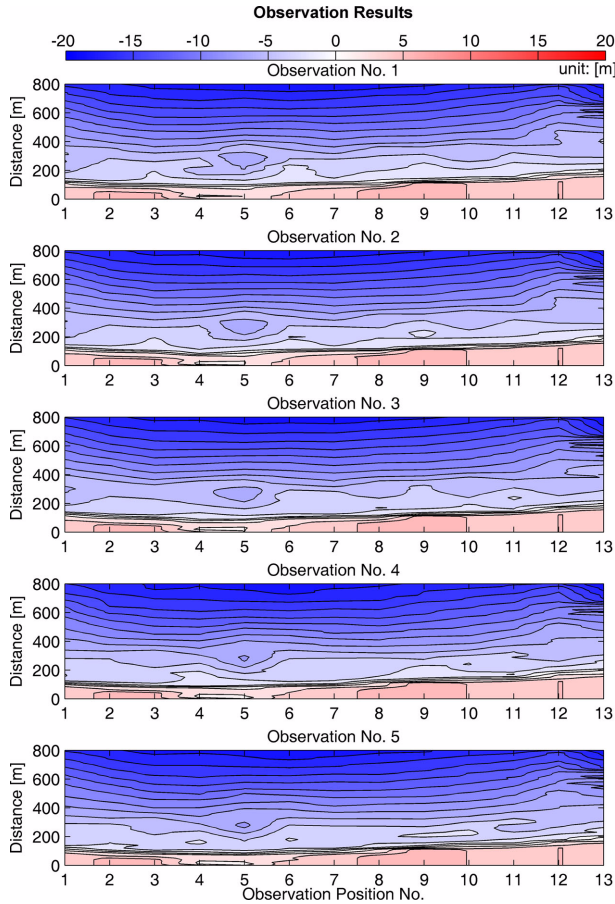


Fig. 7. Contour of treated data set.

2.8 EOF 분석 수행

2.7에서 5×1053 크기의 행렬로 만들어진 단면 자료를 이용한 EOF 분석 수행 절차는 다음과 같다(Fig. 8).

첫째, 생성된 시·공간 자료를 이용하여 공분산행렬을 Eq. (3)과 같이 생성한다.

$$C(r, r') = \langle T(r, t)T(r', t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T(r, t)T(r', t) \quad (3)$$

여기서, $C(r, r')$ = 공분산행렬, $T(r, t)$ = 시간·공간 자료, $\langle X \rangle = X$ 의 앙상블 평균(ensemble average)이다.

후정해수욕장의 경우 1053개의 공간 격자를 총 5회 반복 관측하였으므로 시·공간 자료는 5×1053 크기의 행렬이며 이를 이용해 산정된 공분산행렬은 1053×1053 의 정사각행렬(square matrix)이 된다.

둘째, 공분산행렬의 경험고유함수(EOF)를 산정한다. 이는 매우 잘 알려진 과정이므로 행렬의 고유값(eigen value)과 경험고유함수를 계산하는 과정에 대한 상세한 기술은 생략한다. 단 여기서 생성되는 경험고유함수는 1053×1 의 크기를 가지는 5개의 열벡터(column vector)이다.

셋째, 시·공간 자료에 각각의 고유함수를 곱하여 PCt를 산정한다. 이 과정은 Eq. (2)에서 기술한바 있으며 이때 생성된 5×1 열벡터가 PCt가 된다.

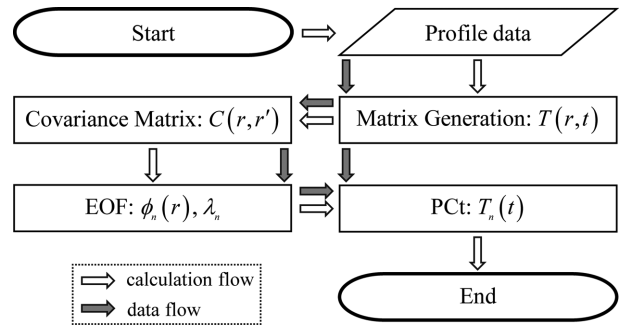


Fig. 8. Flow of EOF analysis.

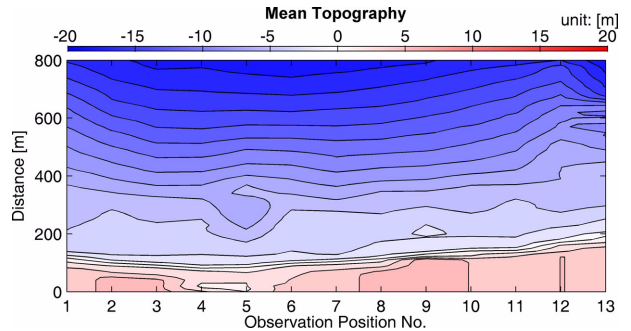


Fig. 9. Mean topography of Hujeong Beach.

3. 결과 및 토의

3.1 평균 해빈에 대한 지형변화

총 5회 실시된 관측값을 각 격자점(Figs. 6-7)에 대해 평균하여 평균 해빈지형을 얻었으며 이를 등고선으로 나타내었다(Fig. 9).

각 관측별로 발생된 모래 이동을 고찰하기 위해 평균 해빈 지형과 관측값의 차를 산정하였으며 Fig. 10과 같다. 1차 관측에서는 1, 4, 그리고 10번 기선의 약 200 m 지점을 제외한 거의 모든 지역에서 평균해빈 보다 높은 표고값을 나타내고 있다. 2차 관측에서는 1차 관측에서 보인 표고값의 전반적인 형태를 유지하고 있으나 11, 12, 그리고 13번 기선의 해안선 인근 지형을 제외한 전 지역에서 1차 관측 결과와 비교해 지형이 보다 완만해 졌다. 11, 12, 13번 기선의 해안선 인근 지형은 후정해수욕장 운영에 가장 밀접한 영향을 미치는 지점으로 2차 관측 시점에서 심각한 유실이 발생하였다. 3차 관측에서는 1~3번 기선의 해안선 인근과 7, 12번 기선을 제외한 약 400 m 인근 지역을 제외한 전 지역에서 평균 표고값 보다 낮은 표고값이 관측되었다. 4차 관측의 경우 역시 일부 쇄파대 지역을 제외한 전 지역에서 평균 해빈지형보다 낮은 지형이 관측 되었다. 5차 관측에서는 4차 관측에서 관측된 지형과 비슷한 경향을 보이고 있어 그 변화가 크지 않다.

평균해빈지형과 비교했을 때 가장 큰 변화를 보이는 관측 결과는 첫 번째와 네 번째 관측으로 첫 번째 관측의 경우 평균지형에 비해 퇴적이 우세한 양상을 보이고 있으며 네 번째 관측의 경우 침식이 우세한 양상을 보이고 있다. 이러한 변화는 특히 쇄파대와 해안선 인근에서 매우 뚜렷하게 관찰된

다. 이는 봄과 여름에 퇴적되어 있던 모래가 가을과 겨울에 침식되는 전형적인 모래 이동의 계절적 변화를 잘 설명하고 있으며 다섯 번째 관측에서 침식 지역의 등고선의 음영이 연하게 변화되는 것으로부터 침식된 모래가 다시 복구되는 과정의 시작되고 있음을 유추할 수 있다. 또한 영역 내의 모래 총량이 변화하고 있어 모래의 횡방향이동 또한 대상지역의 모래 이동에 작지 않은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

평균해빈지형과 각 관측결과를 비교하여 전체적인 해빈지형의 변화를 분석할 수 있었다. 그러나 이 방법의 경우 5번의 관측만으로 모래 이동의 특성과 그 기인력을 정확히 분리하고 그 크기를 산정하기에는 어려움이 있다.

3.2 EOF 분석

후정해수욕장에서 총 5회 관측된 13개 단면 관측 결과를

Table 4. Eigen values

Loading Vectors	1 st LV	2 nd LV	3 rd LV	4 th LV	5 th LV
Eigen-value	85.6286	6.35281	2.0576	1.3203	0.6944
Contribution [%]	99.8783	0.0741	0.0240	0.0154	0.0081
Cumulative Contribution [%]	99.8783	99.9524	99.9765	99.9919	100

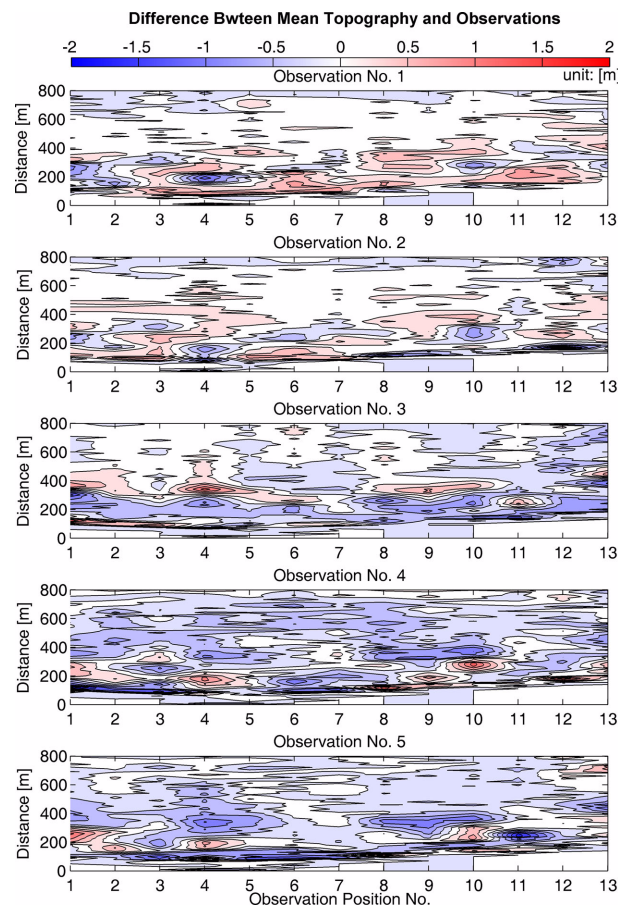


Fig. 10. Difference between mean topography and each observations

모두 사용하여 EOF 분석을 수행하였다. EOF 분석 수행 시 분리되는 LV의 개수는 관측 횟수와 동일하며 총 5개의 LV, PCt(Figs. 11-15), 그리고 고유값(Table 4)을 얻었다.

분석결과 첫 번째 LV의 고유값은 전체 변화율의 약 99.88%(Table 4)를 차지하고 있으며 이는 일반적인 해빈에서 나타나는 공통적인 특징으로 1차원 EOF 분석 시 관측 값의 평균으로 알려져 있다(Dean and Dalrymple, 2002). 본 연구에서 2차원 자료를 분석하여 얻은 첫 번째 LV 또한 PCt의 변화 범위가 0.97~1.03 이내로 작고 그 모양이 평균 지형과 같으므로 2 차원 EOF 분석에 의해 산정된 LV 역시 관측 지역의 평균 지형을 나타내는 것으로 판단된다(Fig. 11). 첫 번째 LV를 제외한 나머지 LV의 변화율에 대한 기여도를 알아보기 위해 첫 번째 LV의 값을 관측 값에서 제거한 결과 각 고유함수의 기여도는 순서대로 각각 68.0%, 15.5%, 9.6%, 6.9%로 산정되었다. 마지막 LV의 경우 그 기여도가 계산의 오차 범위 보다 작았다.

두 번째 LV(Fig. 12)의 경우 PCt를 살펴보면 1~3 번째 관측 시점까지 그 값이 거의 변하지 않다가 4 번째 관측에서 크게 증가한 뒤 지속되는 특징을 나타내고 있으며 LV의 형상이 양의 값과 음의 값이 비슷하게 분포하고 있다. 이는 두 번째 LV에 표현된 모래 이동의 경우 모래가 관측 지역 안에 위치함을 나타낸다. 또한 두 번째 LV의 형태의 변화양상이 평균해빈지형에 대한 차이와 유사한 형태를 나타내고 있다. 특히 5 번째 관측 결과의 경우 두 번째 LV와 매우 유사해 해빈 변형의 가장 큰 요인이 두 번째 LV에 의해서 분리된 것을 알 수 있다. 1차원 관측 값을 EOF 분석할 경우 두 번째 LV는 연안 사주(off-shore bar)의 형성과 관련이 있다고 알려져 있다(Winant et al., 1975). 본 연구에서 2차원 관측 값을 EOF 분석한 결과 두 번째 LV에 연안 사주로 보이는 특징이 일부 관찰되기도 한다. 그러나 연안 사주의 형성이 모래의 중

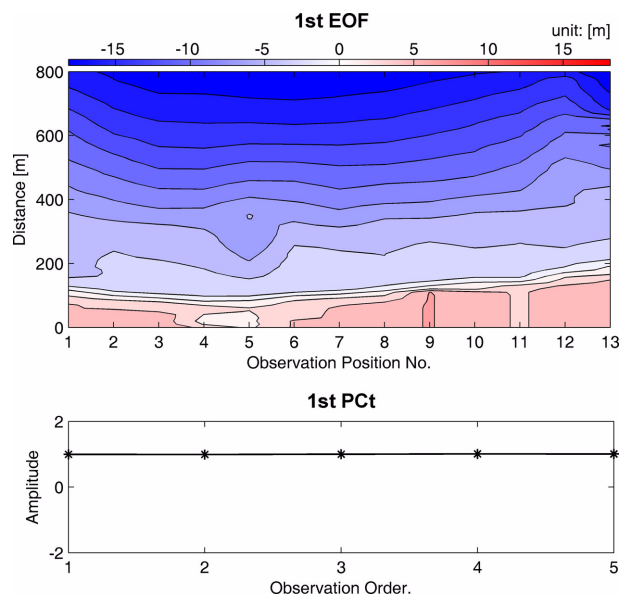


Fig. 11. First Loading Vector and PC time series.

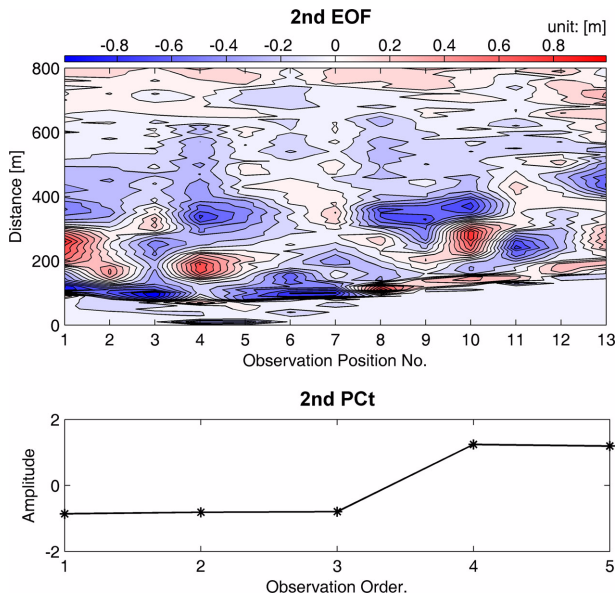


Fig. 12. Second Loading Vector and PC time series.

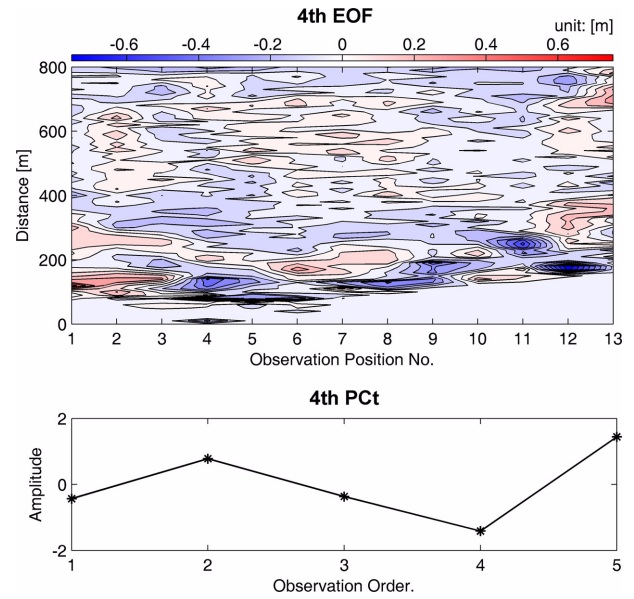


Fig. 14. Fourth Loading Vector and PC time series.

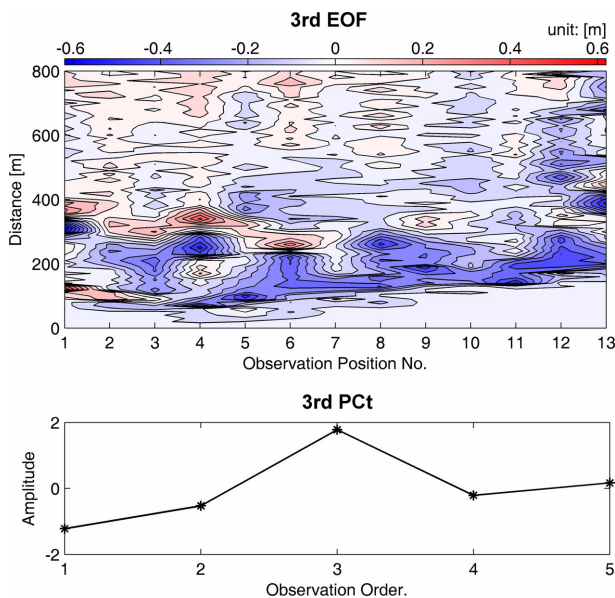


Fig. 13. Third Loading Vector and PC time series.

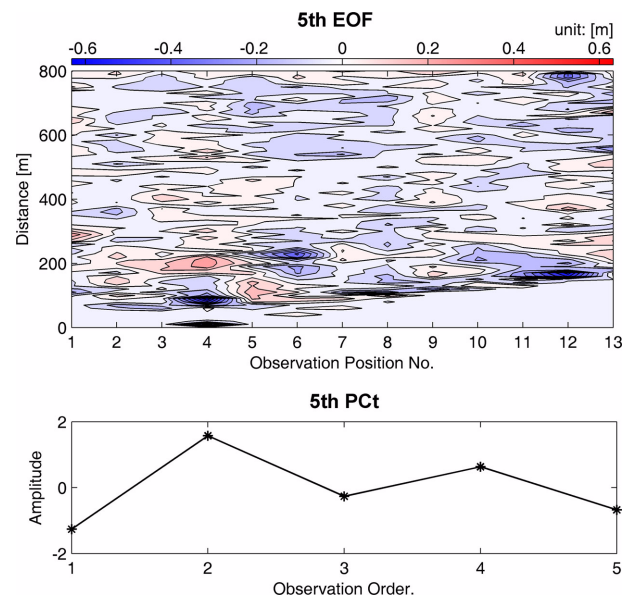


Fig. 15. Fifth Loading Vector and PC time series.

방향 이동을 표현하는 반면 본 연구에서 얻어진 두 번째 LV의 경우 깊은 수심에서 횡방향 모래 이동이 동시에 표현되어 있으며 그 변화의 폭 또한 연안 사주에 의한 변화 보다 커 두 번째 LV를 연안 사주만으로 설명하는 것은 부적절한 것으로 판단 된다.

세 번째 LV는 Fig. 13에서와 같이 양의 값과 음의 값이 균형을 이루지 않고 있다. 이는 이동한 모래가 관측 대상지역 외부에서 유입 또는 유출 된다 것을 의미한다. 후정해수욕장의 양쪽 끝(Fig. 1)에 쌓여있던 모래가 파랑에 의해 남쪽 혹은 북쪽으로 이동하는 현상이 세 번째 LV에 표현된 것으로 판단된다. PCt의 경우 Fig. 13에서와 같이 음의 값에서 지속적으로 증가하는 추세를 나타내고 있으나 세 번째 관측에서 그 값이 크게 증가되었다가 네 번째 관측에서 다시 크게 감

소한다. 이는 세 번째 PCt를 제외한 나머지 4개의 PCt 값이 거의 직선상에 분포하고 있어 장기적 경향성을 가지고 변화하는 것으로 판단되며 이는 세 번째 LV의 경우 일시적 불균형이 장기적 변화 추세에 큰 영향을 주지 않는 것을 나타낸다.

네 번째와 다섯 번째 LV의 경우 지형변화에 대한 기여율이 작고 그 형태가 복잡해 특별한 패턴을 발견하지 못했다(Figs. 14-15). 다만 그 형태가 복잡하고 해안선 주변에서 그 변화율이 큰 것으로 미루어 비교적 변화가 심한 해안선 주변에서 상위 LV에 의해 설명되지 않는 부분을 설명하기 위해 수학적으로 분리된 LV로 판단된다.

3.3 파랑 특성과 연계한 EOF 분석

3.2에서 수행한 EOF 분석은 후정해수욕장에 내습하는 파

랑의 특성을 고려하지 않고 LV와 PCt만을 분석한 것으로 후정해수욕장에서 일어나는 모래 이동을 이해하기 위해서는 파랑과 연계한 EOF 분석이 필요하다.

첫 번째 LV의 경우 평균 해빈 지형을 의미하는 것으로 파랑에 큰 영향을 받지 않으므로 파랑과 EOF 분석을 연계한 분석은 수행하지 않았다. 두 번째 LV의 PCt는 네 번째 관측에서 크게 증가해서 다섯 번째 관측까지 그 형태가 유지되고 있다. 이러한 PCt의 패턴을 이해하기 위해 파랑자료를 분석한 결과 후정해수욕장에 입사하는 파랑의 특성이 11월을 기점으로 크게 변화해 다음해 봄까지 유지되는 것을 Fig. 2, Fig. 4, 그리고 Table 2을 통해 알 수 있다. PCt의 급격한 변화를 보이는 세 번째와 네 번째 관측 사이에 시간 간격이 약 6개월로 상대적으로 길어 매우 급하게 증가하고 있는 것으로 보여지나 실제로는 지속적인 파랑에 의해 여름형 해빈지형에서 겨울형 해빈지형으로 변화한 결과라 할 수 있다.

세 번째 LV의 경우 PCt가 일정한 기울기로 증가하는 경향성을 가지고 세 번째 관측에서 크게 증가하고 다시 네 번째 관측에서 복구된다. 세 번째 관측은 폭풍이 끝난 직후 관측한 자료이며 이 폭풍 시 발생한 최대 유의파고는 4.32 미터, 평균파고는 2.15 미터, 그리고 평균 파향은 46.2°로 분석되었다. 관측 직전에 발생한 폭풍은 그 최대 파고가 전 관측 기간 중 두 번째로 큰 값으로 매우 큰 폭풍이었으며 평균 파향이 같은 기간의 평균 파향 보다 6°이상 E 방향으로 기울어져 있으며 여름의 평균 파향과는 12°이상 차이를 보여 해안선의 북측으로 모래를 이동시키는 횡방향 모래 이동을 발생시킨 것으로 판단된다. 이는 세 번째 LV의 형태와 PCt의 움직임과 일관된 결과를 보여주고 있다. 이렇게 북쪽으로 이동된 모래는 북측 해안선의 법선 방향의 크기를 증가시키고 이후 입사되는 겨울철 고파랑에 의해 북측에 퇴적된 모래가 다시 남쪽으로 이동해 PCt가 네 번째 관측 시점에서 다시 복구된 것을 확인 할 수 있다 (Table 2). 후정해수욕장 해안선의 법선 방향은 약 37°인 반면 후정해수욕장에 입사하는 평균 파향은 크기는 파고가 작은 여름철을 제외한 전 계절에서 법선의 방위각 보다 큰 값을 가져 해빈의 북쪽을 향하는 횡방향 모래 이동이 지속적으로 발생하게 되는데 이러한 특징 또한 PCt에 매우 잘 묘사되어 있다. 따라서 세 번째 LV는 파랑에 의해 횡방향으로 이동하는 모래의 움직임을 나타내는 것으로 판단된다.

3.4 후정해수욕장의 모래 이동

이전 절에서 수행한 파랑 특성과 연계된 EOF 분석을 통해 후정해수욕장의 모래 이동의 특성을 분석하였다.

분석에 의하면 후정해수욕장의 모래 이동에서 가장 큰 기여를 하는 것은 두 번째 LV로 표현된 자연 변동에 의한 모래 이동이다. 후정해수욕장은 여름형 해빈과 겨울형 해빈의 형상이 번갈아 발생한다. 이러한 변화는 1년을 주기로 발생하고 모래가 같은 지역 안에서 이동해 깊은 바다로의 영구적인 모래의 유실은 크게 발생하지 않는다.

후정해수욕장 모래 이동에 두 번째로 큰 영향을 미치는 것은 입사하는 파고와 파향에 영향을 받는 횡방향 모래 이동으로 세 번째 LV로 표현된다. 횡방향 모래 이동의 경우 분석 영역 밖으로 모래가 이동하여 해빈의 북측 도류제와 남측 암초 지역에 퇴적되며 북측과 남측의 모래는 침식과 퇴적이 상반되게 일어나게 된다. 세 번째 LV와 PCt를 분석한 결과 북쪽으로 이동하는 모래 이동이 지속적으로 발생하고 있다. 자연 상태에서 북측에 퇴적된 모래에 의해 해안선 변형이 일어나면 다시 남쪽으로 모래가 역으로 이동하게 되어 다시 균형을 찾게 된다. 그러나 후정해수욕장의 경우 급속한 횡방향 모래 이동에 대해서는 자연적 복구가 일어나는 반면 지속적으로 일어나는 횡방향 모래 이동에 대한 자연적 복구의 흔적이 보이지 않는다. 북측으로 이동한 모래가 인근 지역에 퇴적되어 해빈의 형태를 변형시켜 자연적 복구를 유도하지 못하고 있는 것을 의미한다. 이는 도류제 인근에 퇴적된 모래가 도류제를 따라 이동하다 울진 원자력 발전소에서 배출되는 냉각수의 강한 흐름에 실려 심해로 영구 유실되어 발생된 것으로 추정된다.

4. 결 론

후정해수욕장의 단면 관측 자료를 이용하여 EOF 분석을 수행하였다. 분석 시 13개의 단면을 통합한 자료를 사용하였다. 분석결과 첫 번째 고유함수는 관측 자료의 평균 값을 나타내며 이는 1차원 EOF 분석의 첫 번째 고유함수와 동일한 특성을 보이고 있다. 두 번째 고유함수는 여름형 해빈지형과 겨울형 해빈지형의 특성을 설명하고 있으며 파랑 특성에 의한 모래 이동과 일관된 결과를 보이고 있다. 세 번째 고유함수는 횡방향 모래 이동을 설명하고 있으며 해빈에 입사하는 파향으로 인해 남측 암초지대와 북측 도류제 인근에 퇴적된 모래가 남쪽과 북쪽으로 이동하는 현상을 설명하고 있다. 세 번째 고유함수 또한 파랑으로 인한 횡방향 모래 이동 기작과 일관된 결과를 보이고 있다. 네 번째와 다섯 번째 고유함수의 경우 큰 변형이 발생하는 해안선 부근에서 비교적 큰 변화를 보이고 있었으며 패턴이 복잡하고 변화율에 대한 기여율이 작아 상위 LV가 미처 설명하지 못하는 변화를 설명하기 위해 수학적으로 분리된 것으로 판단된다.

분석결과를 후정해수욕장의 모래 이동에 적용한 결과 후정해수욕장 모래 이동에 영향을 미치는 요인은 크기 순으로 계절에 따른 자연변동성과 해빈에 내습하는 파랑의 파고와 입사각에 의해 발생하는 횡방향 모래 이동으로 분석되었다. 자연변동성과 횡방향 모래 이동은 장기적인 관점에서 균형을 이룬다. 그러나 후정해수욕장의 경우 울진 원자력발전소의 냉각수 배출로 발생된 흐름에 의해 모래가 심해로 영구 유실되어 모래 수지의 불균형이 발생되어 북쪽으로의 장기적 모래 이동이 발생되고 있다고 추정된다. 따라서 향후 울진 원자력발전소에서 배출되는 냉각수의 흐름이 인근에 퇴적된 모래에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A2A2A01007921)과 2014년도 정부(해양수산부)의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원(경북씨그랜트사업)을 받아 수행된 연구임.

References

- Aubrey, D. G. 1978. Statistical and dynamical prediction of changes in natural sand beaches. University of California, San Diego.(Ph. D. in Oceanography).
- Aubrey, D. G. (1979). Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 84(C10), 6347-6354.
- Berek, E. and Dean, R. (1982). Field investigation of longshore transport distribution. *Proceedings of 18th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Cape Town, South Africa, 1, 1620-1639.
- Bosma, K. F. and Dalrymple, R. A. (1996). Beach profile analysis around Indian River inlet, Delaware, USA. *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Orlando, Florida, United States, 1, 2829-2842.
- Cheon, S.-H., Suh, K.-D. and Ahn, K. (2013). Short-term beach change analysis at hu-jeong beach using empirical orthogonal functions. *Proceedings of 39th Conference of Korean Society of Civil Engineers*, Jeongseon, Korea, 558-562, (in Korean).
- Clarke, D. and Eliot, I. (1988). Low-frequency changes of sediment volume on the beachface at warilla beach, new south wales, 1975-1985. *Marine geology*, 79(3), 189-211.
- Clarke, D. J. and Eliot, I. (1982). Description of littoral, alongshore sediment movement from empirical eigen-function analysis. *Journal of the Geological Society of Australia*, 29(3-4), 327-341.
- Dean, R. and Dalrymple, R. (2002). *Coastal processes with engineering applications* cambridge university press. New York.
- Dick, J. E. and Dalrymple, R. A. (1984). Coastal changes at Bethany Beach, Delaware. *Proceedings of 19th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Houston, Texas, United States, 1, 1650-1667.
- Larson, M., Hanson, H., Kraus, N. C. and Newe, J. (1999). Short- and long-term responses of beach fills determined by eof analysis. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 125(6), 285-293.
- Liang, G. and Seymour, R. J. (1991). Complex principal component analysis of wave-like sand motions. *Coastal Sediments* (1991), ASCE, 2175-2186.
- Medina, R., Vidal, C., Losada, M. A. and Roldan, A. J. (1992). Three-mode principal component analysis of bathymetric data, applied to "Playa de Castilla" (Huelva, Spain). *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Venice, Italy, 1, 2265-2278.
- Muñoz-Pérez, J. J., Medina, R. and Tejedor, B. (2001). Evolution of longshore beach contour lines determined by eof method. *Scientia Marina*, 65(4), 393-402.
- Pruszk, Z. (1993). The analysis of beach profile changes using dean's method and empirical orthogonal functions. *Coastal Engineering*, 19(3), 245-261.
- Winant, C. D., Inman, D. L. and Nordstrom, C. E. (1975). Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, 80(15), 1979-1986.

원고접수일: 2014년 6월 12일

수정본채택: 2014년 8월 1일(1차)

2014년 8월 21일(2차)

게재확정일: 2014년 8월 27일