낙동강 하구 신자도 해변 퇴적물 입도의 시간적인 변화

Temporal Change of Grain Size of the Beach Sediments in the Sinjado, Nakdong River Estuary

김백운* · 이상룡** · 김부근**
B.O. Kim*, S.R. Lee** and B.K. Khim**

요 지 : 낙동강 하구 신자도에서 2005년 11월과 2006년 5월에 남쪽 해변의 상부, 중부 및 하부 조간대에 해당하는 3개의 횡단선(upper, middle 및 lower transect)을 따라 67개 정점에서 총 402개의 표층퇴적물을 채취하여 입도 분석을 실시하였다. 신자도 해변 퇴적물은 단일 모드의 입도로 구성되었고, 2005년에는 3.0 ϕ 의 최빈값이 우세하였으며, 2006년에는 2.5 ϕ 의 최빈값이 우세하였다. 이러한 퇴적물의 조립화는 신자도 해변의 서쪽 지역과 중부 및 하부 정점들에서 더욱 뚜렷하였다. 이 연구에서는 조위에 의해 구분된 횡단선 자료에 근거하여 퇴적물 입도의 시간적인 변화 특성을 규명하는데 초점을 두었다. 이와 같은 목적을 위하여 횡단선간에 평균입도, 분급도 및 왜도와 같은 퇴적물 조직 변수를 비교할 수 있는 통계적 검정법을 이용하였다. 평균입도는 해변 중부와 하부 정점들에서, 분급도는 해변 상부와 하부 정점들에서, 왜도는 해변 전체에서 통계적으로 유의한 시간적인 변화가 나타났다. 또한, 평균입도와 왜도 사이에 역의 상관관계는 2005년에 비하여 2006년에 더욱 뚜렷하였다. 2005년 11월에서 2006년 5월 까지 신자도 해변 퇴적물의 시간적인 변화는 평균입도와 분급도는 감소하였고, 왜도는 증가하였으며, 평균입도와 왜도 사이에 역의 상관관계가 강화되었다.

핵심용어 : 표층퇴적물, 입도분석, 통계적 검정법, 낙동강 하구, 울타리섬

Abstract : Grain size analysis was conducted for a total of 402 surface sediments collected from 67 sites along three (upper, middle, and lower) transects corresponding to the high-, mid-, and low-intertidal zone of beach on the Sinjado, Nakdong River estuary in Nov. 2005 and May 2006. Sinja-do beach sediments showed uni-modal grain size distributions, in which the mode of 3.0 ϕ was dominant in 2005 whereas the mode of 2.5 ϕ in 2006. This coarsening trend was more remarkable in the western side of beach as well as in the mid- and low-intertidal zone. In this study, we focused on investigating characteristics of sediment size changes on the basis of transect data that differ in tidal elevation. For this purpose, a statistical test was applied for transect by transect comparison of grain size parameters such as mean, sorting, and skewness. Mean values between middle and lower transect, sorting values between upper and lower transect, and skewness values over the beach reflected statistically significant temporal changes. Also, mean and skewness parameters showed an inverse relationship which was more stronger in 2006 than in 2005. Temporal changes in Sinja-do beach sediments resulted in decrease of mean and sorting values but increase of skewness values, intensifying the inverse relationship between mean and skewness parameters.

Keywords : surface sediment, grain size analysis, statistical test, Nakdong River estuary, barrier island

1. 서 론

낙동강 하구에 우리나라의 대표적인 삼각주 지형이 형성되어 있으며, 삼각주는 하천의 영향을 많이 받은 하중도(inter-distributary island)로 구성된 상부삼각주와 바다의 영향을 많이 받은 사주 또는 울타리섬(barrier island), 간석지(tidal flat) 및 해안 퇴적평야로 구성된 하부삼각주로 구분된다(권, 1973). 낙동강 하부삼각주의 최외측에 형성되어 있는 진우도, 신자도 및 도

요동의 3개의 울타리섬은 Stutz and Pilkey (2002)가 제시한 삼각주 울타리섬 분류에서 Mangoky 유형에 속한다. 이 유형의 울타리섬은 섬의 길이와 폭이 짧고 좁으며, 조석구(tidal inlet)가 좁은 지형적 특성을 보인다. 그리고 하천유량이 적거나 중간 정도이고, 파고가 중간에서 높은 정도이며, 중조차(meso-tidal range)인 연안환경에서 주로 형성된다.

낙동강은 삼각주에 의해 동·서낙동강으로 나뉘어 흐르는 데(Fig. 1), 1930년대에 대저수문과 녹산수문의 건설로 인하

*군산대학교 새만금환경연구센터(Kunsan National University, Saemangeum Environmental Research Center)

**부산대학교 해양시스템과학과(Corresponding author : Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 609-735, Korea. bkkhim@pusan.ac.kr)

Fig. 1. Map showing the Nakdong River estuary and distribution of barrier islands. The study area is Sinjado.

여 서낙동강이 막히게 되어 현재 대부분의 물은 동낙동강으로 유출되고 있다(권, 1973). 1980년대에 동낙동강은 하구둑 건설로 인하여 담수와 해수의 교환이 제한받게 되었다(부산 지방환경청, 1992). 1990년대에 명지주거단지, 2000년대에 녹산국가산업단지 조성을 위한 공유수면 매립으로 낙동강 하구는 대규모의 인위적인 지형변화를 수반하였다(김·이, 2009). 따라서 낙동강 하구는 육상으로부터의 영향(기후, 강우, 하천 유량, 유입토사)뿐만 아니라 해양환경의 조건(파랑 및 조석, 지형적 특성, 수심)과 더불어 유로변경과 연안개발에 의한 영향이 복합적으로 작용하는 매우 특수한 환경이다(유 등, 2006; 윤 등, 2007; 이 등, 2007). 장기간에 걸친 낙동강 하구의 변천과 관련하여 물질순환의 변화(이·윤, 2003; 장·김, 2006; 김 등, 1999), 지형 및 해안선의 변화(권, 1973; 반, 1986; 오, 1999; 이·김, 2002; 김 등, 2003; 김, 2005; 김 등, 2007; 윤 등, 2007; 이 등, 2007), 표층퇴적물 분포의 변화(김·이, 1980; 김·하, 2001; 윤·이, 2008; 김 등, 2009) 등을 규명하고자 다양한 연구가 수행되었다.

울타리섬은 육지(mainland), 배후습지(backbarrier lagoon), 조석구 및 조석구 삼각주(inlet delta), 울타리섬, 울타리섬 대지(barrier platform), 해안 전면부(shoreface) 등 6개의 퇴적지형으로 구성되어 상호작용하는 연안시스템의 한 부분을 차지한다(Oertel, 1985). 이러한 6개의 퇴적환경은 연안 모래 퇴적체를 ‘울타리섬’으로 인식하는데 필요한 구성요소들이며, 각 구성요소의 지형학적 그리고 퇴적학적 진화는 인접한 구성요소의 환경뿐만 아니라 연안시스템 전체에 영향을 미친다(Oertel, 1985). 낙동강 하구 울타리섬은 현재까지 삼각주 지형을 구성하는 다른 지형 요소와 달리 비교적 자연적인 상태가 유지되어 왔다. 울타리섬의 지형은 가시적인 대규모의 변화를 보였고, 이러한 지형변화가 삼각주 전체 지형변화의 일부분에 불과하지만 삼각주 지형변화를 대표할 수 있는 자료로서 연구의 대상이 되어 왔다. 이와 더불어 해수면 위에 노출된 울타리섬의 지형은 관측이 용이하고 기록이 가능하였기 때문이다. 이에 비하여 울타리섬을 구성하는 퇴적물과 퇴적 환경에 대한 연구는 부족한 실정이다. 실제로 지형변화는 퇴적물의 침식/운반/퇴적 과정을 수반하기 때문에, 퇴적학적 연

구는 울타리섬의 지형변화와 하구의 물질순환 특성을 이해하는데 중요한 역할을 할 것이다.

김 등 (2007)은 진우도-신자도-도요등의 해변에서 3개의 시료채취열을 따라 표층퇴적물을 채취하여 퇴적물의 입도 특성과 공간 분포를 제시하였다. 평균 입도의 분포는 상부 조간대와 조석구 부근에서 조립질 퇴적물이 분포하고, 왜도는 음성 왜도가 주로 나타나지만 조석구 부근에서 양성 왜도가 나타나는 경향이 있음을 보고하였다(김 등, 2007). 그러나 이 연구는 1회의 조사에 근거하였기에 해변 퇴적물의 시간적 변화에 대한 정보를 제공하지 못하였다. 일반적으로 해변 퇴적물은 계절적으로 변하는 파랑에 의하여 계절적인 입도의 변화를 나타낸다(Dubois, 1989). 특히 하구의 퇴적작용은 조석 및 파랑의 상호작용뿐만 아니라 하천유량 및 퇴적물 공급에 의하여 결정되며, 하천유량과 파랑은 계절에 따라 변하는 외력 이므로 지형변화와 퇴적물의 분포를 비교하기 위해서는 계절적인 조사가 요구된다. 이러한 관점에서 김 등 (2009)은 진우도를 대상으로 해변의 표층퇴적물에 대한 2회의 조사를 수행한 결과, 해변 퇴적물에 시·공간적인 변화가 뚜렷하게 나타났다고, 조립화된 퇴적물은 양성 왜도와 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 이러한 퇴적물의 입도 변화는 낙동강 하구의 유출에 의한 공급과 파랑에 의한 제거가 계절적으로 다른 시기에 작용하여 발생하는 것으로 해석하였다(김 등, 2009).

이 연구는 김 등 (2009)과 마찬가지로 낙동강 하구의 신자도 해변을 대상으로 상부, 중부 및 하부 조간대에서 2005년 11월과 2006년 5월에 채취한 표층퇴적물을 이용하여 평균입도, 분급도 및 왜도와 같은 퇴적물 조직 변수의 시간적 변화 특성을 규명하고자 한다. 비모수적 통계 검정법(non-parametric statistical test)을 이용하여 조위로 구분된 횡단선 자료 사이에 퇴적물 조직 변수의 차이가 통계적으로 유의한지를 확인하였다. 또한, 횡단선 별로 퇴적물 조직 변수 사이의 상관관계와 그 시간적 변화 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

낙동강 하구의 신자도 해변에서 2005년 11월과 2006년 5월에 2회에 걸쳐 표층퇴적물을 채취하였다. 신자도의 남쪽 해안선을 따라 서쪽에서 동쪽으로 67개의 정점을 설정하였다. 각 정점에서 해안선에 수직인 방향으로 만조선 근처의 상부 조간대, 평균 해변 근처의 중부 조간대 그리고 간조선 근처의 하부 조간대에 해당하는 세 지점에서 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 2). 따라서 해변에 평행한 3개의 횡단선(upper, middle 및 lower transect)에서 총 402개의 퇴적물이 채취되었다.

이 연구는 김 등(2009)의 연구조사와 동일한 시점에 수행된 것으로서, 일반적으로 계절은 봄-여름-가을-겨울 또는 여름-겨울로 대표하여 분류된다고 가정할 때, 11월의 경우 여름철이 지나고 겨울철이 시작되기 전의 상태로 간주하였고,

Fig. 2. Sampling of surface sediments on the beach of Sinjado. Surface sediments are collected along three (Upper as blue dot, Middle as black dot, and Lower as red dot) transects corresponding to the high, middle, and low intertidal zone. Each transect consists of the west-to-east 67 sampling sites.

5월의 경우는 겨울철이 지나고 여름철이 시작되기 전으로 간주하였다. 따라서 11월과 5월에 채취된 해변 퇴적물은 아마도 여름철과 겨울철의 수리학적 특성을 경험하고 난 후 변이적인 단계의 퇴적물의 특성을 보여 줄 것으로 판단하였다.

채취한 퇴적물을 적당량(20 g) 취하여 500 ml 비커에 담고 유기물 제거를 위해 5% 과산화수소수(H_2O_2)와 반응시켰다. 시료에 소량의 패각이 함유되었지만 탄산염 제거 과정은 생략하였다. 유기물 제거과정을 거친 뒤, 3차례의 세척을 통해 잔류된 과산화수소수를 제거하였고, 60°C의 건조기에서 세척된 퇴적물을 건조하였다. 건조된 퇴적물은 진탕기를 이용하여 0.5φ 간격으로 0φ~4φ까지 체질하였다(Ingram, 1971). 4φ 이상의 퇴적물은 4.5φ로 간주하였다. 체질된 퇴적물은 각 φ 별로 무게를 측정한 후 총 무게에 대한 비율을 계산하였다(Galehouse, 1971). 퇴적물 조직 변수(평균입도, 분급도, 왜도)는 GRADISTAT 프로그램을 이용하여 계산하였고(Blott and Pye, 2001), Folk and Ward (1957)가 제시한 도표계산법을 적용하였다.

퇴적물의 입도분석 자료는 해변을 따라 67개의 정점을 잇는 횡단선이 3개의 조위면에 위치한 격자 형태의 자료(Fig. 2)로서 두 시기에 걸쳐 수집된 것이다. 이로부터 퇴적물 조직 변수의 시·공간적 변동 경향은 다양한 방법으로 분석될 수 있다. 일반적으로 해변에서 표층퇴적물은 공간적인 변화가 매우 크기 때문에 해변의 표층퇴적물을 대표하는 기준 위치는

중부 조간대로 정의한다(Bascom, 1951; Dubois, 1989). 해변에서 표층퇴적물의 공간적인 변동성은 해변에 수평 또는 수직으로 작용하는 파랑, 조석, 바람 등 외력의 기울기(gradient)에 좌우된다. 예를 들면, 해변을 따라 표층퇴적물의 입도가 변화하는 경향이 나타날 수 있는데 이로부터 퇴적물의 이동 방향을 추정할 수 있다(Masselink, 1992).

이 연구에서는 해변에 작용하는 외력에 대응하여 퇴적물의 입도가 어떻게 공간적으로 변화하는지를 규명하기 보다는 퇴적물 입도의 시간적인 변화 특성을 규명하는데 초점을 둔다. 퇴적물 조직 변수의 변화에 대하여 어떠한 가정을 도입하지 않더라도, 통계적인 검정법을 사용하여 퇴적물 조직 변수가 시간에 따라 변화한다는 것을 입증할 수 있다. Livingstone (1989)은 사막의 풍성 퇴적물인 사구를 대상으로 퇴적물 조직 변수의 월간 비교를 위하여 비모수적 통계 검정법인 윌콕슨 랭크 테스트(Wilcoxon Rank Test)를 이용하였다. 이러한 통계 검정법은 일련의 정점들에서 어느 한 달에 채취된 시료들이 다른 달에 채취된 시료들과 쌍을 이루고, 쌍을 이룬 시료들에서 퇴적물 조직 변수의 차이를 서열화함으로써 두 시기의 자료를 비교한다 (Livingstone, 1989). 이 연구에서는 조위로 구분된 횡단선 자료(67개 정점의 자료)에 근거하여 횡단선간 퇴적물 조직 변수의 시간적 또는 공간적 차이에 대하여 통계적 유의성을 조사하였다.

3. 결 과

Fig. 3은 2005년 11월과 2006년 5월에 상부, 중부 및 하부 횡단선을 따라 퇴적물 입도분포의 최빈값과 입도 조성비의 변화를 도시한 것이다. 입도분포의 최빈값은 2005년 11월에 신자도 동쪽의 정점 47~55를 제외하고는 전반적으로 3.0φ가 우세한 분포를 보인 반면, 2006년 5월에 해변 중부와 하부에서 2.5φ가 우세한 분포를 보였다. 최빈값이 2.0φ인 퇴적물은 2005년 11월에 정점 54와 56의 해변 하부 정점에서 나타났으나, 2006년 5월에는 정점 4와 48의 해변 중부 그리고 정점 11과 13의 해변 하부 정점들에서 나타났다. 이러한 최빈값 분포의 변화는 전반적으로 신자도의 퇴적물은 2006년 5월에 조립화 되었고, 가장 조립한 퇴적물이 분포하는 지역이 신자도의 동쪽에서 서쪽으로 변화하였음을 지시한다.

입도 조성비의 변화에서는 3.5φ를 제외하고 3.0φ, 2.5φ 및 2.0φ의 조성비에서 국지적으로 정점간 변동폭이 크게 나타났다. 전반적으로 퇴적물의 조립화 현상이 관측되었다(Fig. 3). 2005년 11월에 모든 횡단선에서 입도 조성비는 신자도 동쪽의 정점 47~55를 제외하고는 3.0φ의 조성비가 가장 우세하였다. 그러나 2006년 5월에는 3.0φ 함량이 전반적으로 감소한 결과, 해변 상부는 3.0φ와 2.5φ의 조성비가 동등하게 우세하였으며, 중부와 하부에서는 2.5φ의 조성비가 가장 우세하였다. 특히 신자도 서쪽 지역의 해변 중부와 하부에서 3.0φ 함량의 감소와 2.0φ 함량의 증가로 인하여 조립화의 경향이

Fig. 3. Variations in mode of grain size distribution and percentile of grain size compositions (2.0ϕ , 2.5ϕ , 3.0ϕ , 3.5ϕ) along Upper, Middle, and Lower Transects for Nov., 2005 and May, 2006.

Fig. 4. Variations in grain size textural parameters (mean, sorting, and skewness) along Upper, Middle, and Lower Transects for Nov., 2005 and May, 2006.

현저하게 나타났다.

Fig. 4는 2005년 11월과 2006년 5월에 3개의 횡단선을 따라

퇴적물 조직 변수(평균입도, 분급도 및 왜도)의 변화를 도시한 것이고, Table 1은 횡단선 별로 퇴적물 조직 변수에 대한

Table 1. Descriptive statistics of sediment size for transect

		Mean (ϕ)				Sorting (ϕ)				Skewness			
		Mean	St. Dev	Max.	Min.	Mean	St. Dev	Max.	Min.	Mean	St. Dev	Max.	Min.
Upper	2005	2.41	0.11	2.64	2.21	0.42	0.04	0.49	0.31	-0.15	0.09	0.02	-0.32
	2006	2.41	0.09	2.59	2.19	0.39	0.03	0.45	0.32	-0.04	0.07	0.05	-0.20
Middle	2005	2.46	0.10	2.73	2.29	0.41	0.03	0.46	0.34	-0.15	0.07	-0.03	-0.28
	2006	2.31	0.11	2.55	2.01	0.41	0.03	0.46	0.33	-0.00	0.07	0.23	-0.19
Lower	2005	2.48	0.13	2.71	2.04	0.43	0.04	0.53	0.31	-0.16	0.10	0.27	-0.31
	2006	2.37	0.12	2.57	2.01	0.41	0.03	0.46	0.32	-0.05	0.10	0.28	-0.23
Subtotal	2005	2.45	0.11	2.73	2.04	0.42	0.04	0.53	0.31	-0.15	0.09	0.27	-0.32
	2006	2.36	0.12	2.59	2.01	0.40	0.03	0.46	0.32	-0.03	0.08	0.28	-0.23

평균, 표준편차, 최대값 및 최소값을 정리한 것이다. 평균적으로 신자도 해변의 표층퇴적물은 2005년 11월에 fine sand, well sorted, coarse skewed, 2006년 5월에는 fine sand, well sorted, symmetrical의 퇴적물로 분류되었다(Table 1). 년도별 퇴적물 조직 변수의 평균값을 보면, 평균입도와 분급도는 감소하였고, 왜도는 증가하였다. 이와 마찬가지로 횡단선별 평균값의 년도간 변화도 동일하였다.

년도별 퇴적물 조직 변수의 표준편차를 보면, 모든 변수에서 년도간 차이가 미미한 수준이었다(Table 1). 이와 달리 횡단선별 퇴적물 조직 변수의 표준편차에는 차이가 나타났다. 2005년 11월에 해변 하부에서 퇴적물 조직 변수의 표준편차가 가장 크게 나타났다. 이것은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 이 횡단선에서 정점간 퇴적물 조직 변수의 변동폭이 가장 크다는 것을 의미한다. 분급도의 경우, 2005년과 2006년에 해변 중부에서 표준편차가 가장 작았다.

Fig. 4에서 횡단선을 따라 퇴적물 조직 변수의 지역적 차이가 뚜렷하게 나타났다. 신자도 서쪽 지역에서, 특히 해변 중부와 하부 정점에서, 년도간 평균입도의 차이가 크게 나타났다. 왜도의 경우에는 해변 전체에 걸쳐 시간적인 변화가 나타났다. 2005년 11월에 왜도는 신자도 동쪽의 일부 지역을 제외하고는 대부분 음의 값을 보였다. 특히 해변 중부에서 음성 왜도가 우세하였다. 그러나 2006년 5월에 대부분의 왜도는 0 가까이 수렴하거나 양성 왜도로 변화였다. 이러한 왜도의 변화는 신자도의 서쪽 지역에서 더욱 현저하였다.

Table 1과 Fig. 4에서 모든 퇴적물 조직 변수는 시간적 변화를 보였다. 그러나 이러한 변화가 통계적으로 유의한지 검토할 필요가 있다. Table 2에는 비모수적 검정법을 이용하여 횡단선간에 퇴적물 조직 변수를 비교한 결과를 정리하였다. 평균입도의 경우 해변 중부와 하부 정점에서, 분급도의 경우 해변 상부와 하부 정점에서 통계적으로 유의한 시간적인 변화가 나타났다. 왜도의 경우, 해변 전체에서 횡단선간 시간적인 변화가 통계적으로 유의하였다.

동일한 조위의 년도가 다른 횡단선 사이의 비교는 퇴적물 조직 변수의 시간적인 변화를 검정한다. 이와 유사한 방법으로

Table 2. Transect-by-transect comparison of grain size parameters using Wilcoxon Paired Samples Test (significance level 0.01)

		Mean (ϕ)		Sorting (ϕ)		Skewness	
		H	P	H	P	H	P
Temporal comparison	2005 Upper vs 2006 Upper	0	0.779	1	0.000	1	0.000
	2005 Middle vs 2006 Middle	1	0.000	0	0.488	1	0.000
	2005 Lower vs 2006 Lower	1	0.000	1	0.006	1	0.000
Spatial comparison	2005 Upper vs Middle	1	0.000	0	0.066	0	0.613
	2005 Middle vs Lower	0	0.179	0	0.010	0	0.277
	2006 Upper vs Middle	1	0.000	1	0.000	1	0.001
	2006 Middle vs Lower	1	0.002	0	0.191	0	0.011

동일년도에서 조위가 다른 횡단선간 비교는 해변에 수직인 방향의 공간적인 변화를 검정하는 것이다(Table 2). 2005년 11월에 해변 상부와 중부 사이에 평균입도에서만 공간적인 변화가 통계적으로 유의하였다. 2006년 5월에는 해변 상부와 하부 사이에 모든 변수에서 공간적인 변화가 통계적으로 유의하였다. 해변 중부와 하부 사이에 평균입도의 변화는 유의하였으나, 분급도와 왜도의 변화는 유의하지 않았다. 이는 2005년과 달리 2006년에는 해변에 수직인 방향으로 퇴적물 입도에 공간적인 변동이 나타났음을 의미한다.

Table 3은 횡단선별로 퇴적물 조직 변수 사이에 선형회귀의 결과를 도식한 것이다. 신자도 해변의 퇴적물은 평균입도와 왜도 사이에 상관관계가 가장 좋았으며, 상관계수는 음의 값을 보였다. 즉, 평균입도가 감소할수록(입자 크기가 증가할수록) 왜도의 값이 증가하는 역의 상관관계를 보였다. 이러한 상관관계는 2005년 5월에 비해 2006년 11월에 더욱 강화되었다. Fig. 5에서 평균입도-왜도 간 산포도에서 퇴적물은 시기에 따라

Table 3. Result of linear regression between grain-size parameters for transect ($Y = \text{slope} * X + Y \text{ intercept}$)

		X = Mean Y = Sorting		X = Mean Y = Skewness		X = Sorting Y = Skewness	
		Slope	R ²	Slope	R ²	Slope	R ²
2005	Upper	-0.25	0.46	-0.72	0.75	1.26	0.31
	Middle	-0.16	0.38	-0.39	0.25	1.08	0.13
	Lower	-0.21	0.38	-0.55	0.52	0.53	0.06
2006	Upper	-0.25	0.57	-0.56	0.61	1.15	0.30
	Middle	-0.16	0.46	-0.51	0.70	1.04	0.16
	Lower	-0.13	0.26	-0.74	0.77	0.54	0.03

Fig. 5. Relationships between mean grain size and skewness of Upper, Middle, and Lower Transects for Nov., 2005 and May, 2006.

그 분포 구역이 다르게 나타났다. 2006년 5월에 채취된 퇴적물은 2005년 11월에 채취된 퇴적물에 비하여 선형 관계의 상부에 분포하고 있는데, 특히 해변 중부에서 이러한 경향이 매우 뚜렷하였다. 즉, 2006년에 신자도의 퇴적물은 상대적으로 조립화 되었을 뿐만 아니라 퇴적물의 왜도가 0에 근접하거나 양의 값을 가질 만큼 퇴적물의 입도 특성이 변화하였다.

Fig. 6은 신자도 해변의 모든 정점에서 2005년 11월과 2006년 5월에 채취한 퇴적물의 평균입도, 분급도 및 왜도에 대하여 각 퇴적물 조직 변수의 시간적인 차이를 이원화하여(두 가지 색으로 표현) 도시한 것으로서 퇴적물 조직 변수의 시간적인 변동에 대한 공간적인 분포를 살펴볼 수 있다. 여기에서 빨간색은 평균입도의 세립화, 분급도의 불량화, 왜도의 양수화(winnowing)를 의미하며, 파란색은 이와 반대의 것을 의미한다. 평균입도의 차이를 보면, 조립화된 정점이 매우 우세하게

Fig. 6. Map showing difference of mean grain size (red: fining, blue: coarsening), sorting (red: being worse, blue: being better), and skewness (red: winnowing, blue: focusing) between Nov., 2005 and May, 2006.

분포하고 있으며, 신자도 동쪽 일부 지역에서 세립화된 정점이 분포한다. 분급도의 경우 전반적으로 양화의 정점이 약간 우세하게 분포하며, 불량화의 정점이 신자도의 서쪽 지역에 나타난다. 왜도의 경우 양수화의 정점이 신자도 해변 전체를 지배할 만큼 가장 우세하게 분포한다.

4. 고 찰

2005년 11월과 2006년 5월에 채취된 신자도 해변 퇴적물은 퇴적물 입도분포의 최빈값과 입도 조성비 그리고 평균입도, 분급도 및 왜도에서 시·공간적인 변화가 뚜렷하였다. 또한, 같은 시기의 퇴적물에서 공간적인 변동이 매우 크게 나타났다. 이는 신자도 해변 퇴적물이 계절적으로 변화하기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 향후 낙동강 하구 울타리섬의 퇴적학적 연구를 위한 조사에서 퇴적물 시료의 채취 시기와 장소는 조사 결과를 해석하는데 중요한 고려사항이 될 것이다. Dubois (1989)와 Livingstone (1989)의 연구와 같이 퇴적물의 계절적인 변화를 상세히 규명하기 위해서는 월별 관측자료가 수집될 필요가 있다. 월별 자료의 가치는 기존 자료 또는 동시에 관측된 파랑, 유출수량 또는 해변의 침식/퇴적 자료 등과 상관관계 분석을 통하여 퇴적물 입도 변화와 외력 사이에 작용하는 시간적인 특성을 파악할 수 있기 때문이다.

같은 시기의 퇴적물 조직 변수의 자료에서 공간적인 변동이 크게 나타났는데 이의 영향을 최소화하기 위하여 조위에 의한 횡단선 자료에 근거하는 제한적인 조건 하에서 횡단선간에 비교하였다. 횡단선에 평행한 방향으로 어떤 경향을 보이는 퇴적물 입도의 공간적인 변동은 퇴적물 이동과 연관될 수 있다 (Masselink, 1992). 이 연구에서 비모수적 검정법은 이러한 공간적인 변동과 상관없이 시간적인 변화에 대한 통계적 유의성을 검증한다. Fig. 4에 도시된 바와 같이 해변 상부에서 평균입도와 해변 중부에서 분급도의 경우, 횡단선에 내재된 공간적인 변동으로 인하여 횡단선간 퇴적물 조직 변수에서 시간적인 차이가 있는 것처럼 보였다. 그러나, Table 2에 제시된 바와 같이 시간적인 변화가 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 신자도 해변과 같이 정점간 공간적인 변동이 심한 퇴적물에서 통계적 검정법은 퇴적물 조직 변수의 시간적인 변화를 입증하는데 매우 중요한 역할을 하였다.

신자도 해변에서 2005년 11월과 2006년 5월 사이에 퇴적물의 평균입도와 분급도는 감소하였고, 왜도는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 퇴적물 조직 변수의 시간적인 변화 양상은 진우도 해변 퇴적물에서도 유사하였다(김 등, 2009). Dubois (1989)는 해변 퇴적물에서 평균입도의 조립화, 분급도의 양호화, 왜도의 양성화와 같이 시간적인 변화가 발생하는 것은 파랑의 계절적인 변화로 인하여 원래의 퇴적물에서 세립질 퇴적물이 제거된 결과라고 해석하였다. 왜도가 양성화되는 까닭은 일정한 양의 세립질 퇴적물이 제거된 후 남아있는 퇴적물에는 조립질 퇴적물의 함량이 상대적으로 증가한 반면

세립질 퇴적물의 함량이 상대적으로 감소함으로써 입도분포 곡선이 세립질쪽으로 꼬리(tail)를 갖는 형태로 변하기 때문이다. 한편, 낙동강 하구의 경우 파랑의 계절적인 특성은 먼 바다에서 파랑의 변화가 나타나지만 파고의 변화는 크지 않다고 보고되고 있다(김 등, 2009). 반면 강수량은 하계에 집중되어 있기 때문에 낙동강 하구둑으로 배출된 퇴적물 공급의 시간적인 변화가 울타리섬 해변 퇴적물의 입도에 영향을 미치는 일차적인 요인으로 판단된다. 즉, 하계에 세립질 퇴적물의 공급과 혼합이 해변 퇴적물에서 평균입도와 분급도를 증가시키고, 퇴적물 공급이 감소하는 동계에는 꾸준한 파랑의 영향으로 퇴적물의 조립화와 분급도의 양호화가 나타나는 것으로 판단된다(김 등, 2009).

신자도 해변 퇴적물은 횡단선별로 평균입도와 왜도 사이의 역의 상관관계가 매우 뚜렷하다. 한편, 평균입도와 분급도 사이에는 어느 정도 역의 상관관계가 나타난다(Table 3). 즉, 평균입도가 감소하면(조립화) 분급도가 증가(불량화)한다. 그런데 평균입도와 분급도는 시간적으로 동시에 감소하는데(Table 1), 이는 평균입도가 감소하면 분급도가 감소(양화)한다는 것을 의미한다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 평균입도와 분급도는 역의 상관관계를 보이면서 시간적으로는 동시에 감소하는 경향을 보인다. 평균입도와 분급도의 시간적인 변화는 앞에서 제시된 바와 같이 세립질 퇴적물의 제거와 관련하여 설명될 수 있다. 그러나, 같은 시기의 퇴적물에 나타난 평균입도와 분급도 사이의 역의 상관관계는 이와 다른 설명이 요구된다. 아마도 해변을 따라 퇴적물의 공간적인 변동을 일으키는 퇴적물 이동 현상과 밀접하게 연관될지도 모른다. 따라서 퇴적물 조직 변수의 공간적인 변화로부터 퇴적물 이동의 경향을 분석하는 방법(Poizot et al., 2008)을 이용하여 신자도 해변 퇴적물의 공간적인 변동 특성을 규명할 필요가 있다.

Fig. 7. Relationships between mean grain size and sorting of Upper Transect for Nov., 2005 and May, 2006.

신자도 해빈에서 가장 조립한 퇴적물의 분포 지역이 2005년 11월에 신자도 동쪽에서 2006년 5월에 신자도의 서쪽으로 변화하였다. 왜도는 2005년 11월에 대부분 음의 값에서 2006년 5월에 0에 근접하거나 양의 값으로 변화하였다. 이러한 퇴적물 조직 변수의 지역적 변화 양상은 진우도에서 관측한 결과(김등, 2009)와 다르게 나타났다. 진우도에서 퇴적물의 조립화는 동쪽 지역에서 뚜렷하였다. 왜도의 경우 진우도의 동쪽 지역에서 왜도가 증가된 값으로 변화되어 0 가까이 수렴하는 변화를 보였다. 신자도의 경우 평균입도와 왜도의 변화가 신자도 전체에서 발생한 현상이었고, 진우도의 경우 진우도의 동쪽에서 주로 나타났다. 이러한 연구들의 비교 결과, 낙동강 하구 울타리섬에서 퇴적물 입도의 변화는 울타리섬 내에서 지역적으로 차이가 있으며, 이러한 지역적인 차이는 울타리섬 간에 다른 양상을 보여주었다. 이것은 아마도 울타리섬 주변의 세부적인 지형특성에 따라 낙동강 하부삼각주 전면에 작용하는 외력이 각기 다른 규모로 변형된다는 점을 시사한다.

5. 결 론

낙동강 하구 삼각주 지형은 유로의 변경과 하구둑 건설 등 인위적인 연안개발로 인하여 장기간에 걸쳐 변화한 결과, 삼각주 전면에 자연상태로 있는 울타리섬의 지형은 현격하게 변화하였다. 울타리섬의 지형변화와 관련하여 퇴적환경의 특성을 규명하기 위하여 신자도 해빈에서 2005년 11월과 2006년 5월의 2회에 걸쳐서 해빈의 상부, 중부 및 하부 조건대에 해당하는 3개의 횡단선에서 표층 퇴적물을 채취하여 퇴적물 조직 변수를 분석하였다. 퇴적물 입도의 공간적인 변동의 영향을 최소화하기 위하여 조위로 구분한 횡단선 자료에 의한 횡단선간 비교를 통하여 퇴적물 입도의 시간적 변화에 대한 통계적 유의성을 검토하였다. 2005년 11월과 2006년 5월 사이에 신자도 해빈 퇴적물에는 시간적인 변화가 뚜렷하였다. 평균입도와 분급도는 감소하였고, 왜도는 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 시간적인 변화는 통계적으로 유의하였다. 또한, 신자도 해빈 퇴적물은 평균입도와 왜도 사이에 역의 상관관계가 뚜렷하였다. 이는 파랑의 작용으로 인하여 세립질 퇴적물이 제거된 결과, 조립화된 퇴적물이 양성 왜도의 특징을 나타내는 것으로 해석된다.

신자도 해빈 퇴적물은 정점간 공간적인 변동성이 크게 나타났다. 이러한 자료에서 퇴적물 조직 변수의 시간적인 차이를 판정하는데 통계적인 검정법은 매우 유용하였다. 신자도 해빈 퇴적물의 시간적 변화는 낙동강 하구 울타리섬의 퇴적환경이 계절적으로 변동할 수 있다는 것을 암시한다. 따라서 울타리섬의 퇴적환경을 파악하기 위해서는 적어도 계절적인 조사 자료가 요구된다. 이러한 시간적인 변화 자료와 함께 신자도 해빈 퇴적물의 공간적인 변동 특성을 이해하기 위해서는 퇴적물 이동의 경향을 분석할 수 있는 수치모형 등 다양한 방법들이 이용될 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원으로 수행되었습니다. 야외조사와 실험실 분석에 도움을 준 부산대학교 학생들(김성한, 민소영, 이혜민)에게 감사드립니다.

참고문헌

- 권혁재 (1973). 낙동강 삼각주의 지형연구. 지리학, 8, 8-23.
- 김기철, 양한섭, 김차겸, 문창호, 장성태 (1999). 수문개폐에 따른 낙동강 하구언 하류부의 해양물리환경변화. 한국해양환경공학회지, 2, 49-59.
- 김백운, 김부근, 이상룡 (2007). 낙동강 하구역 울타리 섬의 해안선 변화율. 한국해안·해양공학회지, 19, 361-374.
- 김백운, 이창경 (2009). 해안 매립지에서 과거 해안선의 산정 (II): 해안선변화 분석. 한국해안·해양공학회논문집, 21, 380-390.
- 김부근, 김백운, 이상룡 (2009). 낙동강 하구역 진우도 해빈의 춘추계 표층퇴적물 조직변수의 변화. 한국해안·해양공학회논문집, 21, 444-452.
- 김상호, 신승호, 양상용, 이종우 (2003). 낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구. 한국해양환경공학회지, 6, 26-36.
- 김석운, 하정수 (2001). 낙동강 하구와 주변 연안역의 표층퇴적상 및 퇴적환경 변화. 한국수산학회지, 34, 268-278.
- 김성환 (2005). 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주의 지형변화. 대한지리학회지, 40, 416-427.
- 김성환, 류호상, 신영호 (2007). 낙동강 삼각주연안 사주섬 표층퇴적물의 입도특성과 공간적 분포. 한국지역지리학회지, 13, 43-53.
- 김원형, 이형호 (1980). 낙동강 하구지역의 퇴적물운반 및 퇴적에 대한 고찰. 대한지질학회지, 16, 180-188.
- 반응부 (1986). 낙동강 하구 연안사주 지형. 부산여대논문집, 21, 463-518.
- 부산지방환경청 (1992). 낙동강 하구언 축조 전후 주요환경 변화조사. 부산지방환경청, 308pp.
- 오건환 (1999). 낙동강 삼각주 말단의 지형 변화. 한국 제4기학회지, 13, 67-78.
- 유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006). 해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시공간 변화. 한국해양공학회지, 20, 54-60.
- 윤은찬, 이종섭 (2008). 낙동강 하구역의 계절적인 퇴적환경 변화특성. 한국해안·해양공학회지, 20, 372-389.
- 윤한삼, 유창일, 강윤구, 류청로 (2007). 낙동강 하구역 삼각주 발달에 관한 문헌 고찰 연구. 한국해양공학회지, 21, 22-34.
- 이상화, 김진후 (2002). 낙동강 하구 사주(모래톱)의 지형조사와 해저토 이동방향에 관한 연구(II). 대한토목학회지, 22, 365-370.
- 이인철, 유창일, 윤한삼 (2007). 낙동강 부정형적 사주발달과 환경인자간의 상관성 비교 연구. 한국해양환경공학회지, 10, 13-20.
- 이종섭, 윤은찬 (2003). 낙동강 하천플룸의 3차원 혼합과정해석. 대한토목학회지, 23, 347-358.
- 장성태, 김기철 (2006). 낙동강 하구에서의 해양 환경 변화. 바다, 11, 11-20.
- Bascom, W.N. (1951). The relationship between sand size and beach-face slope. Trans. Amer. Geophys. Union, 32, 866-874.
- Blott, S.J. and Pye, K. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution

- bution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 26, 1237-1248.
- Dubois, R.N. (1989). Seasonal variation of mid-foreshore sediments at a Delaware beach. *Sediment. Geol.*, 61, 37-47.
- Folk R.L. and Ward W.C. (1957). Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sediment. Petrol.*, 27, 3-26.
- Galehouse, J.S. (1971). Sedimentation analysis. In: *Procedures in Sedimentary Petrology*, New York, Wiley Interscience, 69-94.
- Ingram, R. (1971). Sieve analysis. In: *Procedures in Sedimentary Petrology*, New York, Wiley Interscience, 49-67.
- Livingstone, I. (1989). Temporal trends in grain-size measures on a linear sand dune. *Sedimentology*, 36, 1017-1022.
- Masselink, G. (1992). Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone delta, southern France: A test of the 'McLaren Model'. *Jour. Coastal Res.*, 8, 286-291.
- Oertel, G.F. (1985). The barrier island system. *Mar. Geol.*, 63, 1-18.
- Poizot, E., Mear, Y. and Biscara, L. (2008). Sediment trend analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications. *Earth-Sci. Rev.*, 86, 15-41.
- Stutz, M.L. and Pilkey, O.H. (2002). Global distribution and morphology of deltaic barrier island systems. *Jour. Coastal Res.*, 36, 694-707.

원고접수일: 2011년 6월 24일

수정본채택: 2011년 8월 3일

게재확정일: 2011년 8월 11일