Article

낙동강 하구역 진우도와 신자도 전면의 최근 지형 변화: 2007년-2012년

박진구¹ · 김부근^{1*} · 이희준² · 이상룡¹

¹부산대학교 자연과학대학 해양학과
(609-735) 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
²한국해양과학기술원 해양환경·보전연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Recent Morphological Changes off the Shoreface of Jinwoodo and Sinjado in the Nakdong River Estuary: 2007-2012

Jinku Park¹, Boo-Keun Khim^{1*}, Hee Jun Lee², and Sang Ryong Lee¹

¹*Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Pusan National University
Busan 609-735, Korea*

²*Marine Environments & Conservation Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea*

Abstract : Recently, more attention has been paid to the geomorphological changes in the Nakdong River Estuary, because those changes are caused by artificial activities including weirs, reclamation and construction. In order to analyze quantitatively the recent geomorphological variability in the Nakdong River Estuary, we surveyed the depth and elevation of submarine topography near Jinwoodo and Sinjado from March 2007 to February 2012. A statistical method (based on Digital Shoreline Analysis System) and an Empirical Orthogonal Functions method were used to evaluate the morphological changes. According to the statistical variables (DCE, NDC, EPR, LRR), the highest amount and rate of accumulation were recorded around the Gadeokdo whereas the greatest amount of erosion appeared around the coast off the eastern part of Sinjado. In particular, a dynamic variation of morphology was clearly observed in the vicinity of the sub-tidal channel located between Jinwoodo and Sinjado, which seems to be attributable to channel migration. As a result of the EOF method, the first mode (48.7%) is most closely related to the pattern of morphological variability that might be associated with the westerly movement of sediment by longshore current. The spatial variability of the second mode (16.6%) was high in the shoreface of Sinjado, showing a 4-year periodicity of temporal variability. The strong correlation (coefficient 0.73) between the time coefficient and suspended sediment discharge from Nakdong River emphasizes the role of sediment discharge to deposition in this area. The spatial variability of the third mode (11.3%) was distributed mainly around the coast off the eastern part of Sinjado, which is related to the movement of the coastline of Sinjado. Based on the last 5 year's data, our results suggest that the study area is characterized on the whole by a depositional pattern, but the extent of sedimentation is different locally.

Key words : Nakdong River Estuary, barrier island, morphological change, longshore current

*Corresponding author. E-mail : bkkhim@pusan.ac.kr

1. 서 론

하구(estuary)는 천해 동식물에게 풍부한 먹이와 안전한 서식지를 제공할 뿐만 아니라 지역주민들에게 어업과 레저를 위한 장소로써 이용되는 중요한 지역이다. 하구는 담수와 해수가 만나 혼합되는 전이수역으로 조석, 파랑 및 하천 유출량의 영향을 동시에 받는 매우 복잡한 환경이며 삼각주나 사주 같은 독특하고 다양한 퇴적체들이 발달한다. 그 중 대표적인 퇴적체인 울타리섬(barrier island)은 해안선에 평행한 방향으로 형성된 섬 형태의 지형을 일컫는다. 울타리섬은 태풍이나 해일로부터 육지 해안을 보호하는 역할을 하며 후면에는 만(bay)이나 석호(lagoon), 염습지(salt marsh) 등이 형성되어 동·식물에게 서식지 또는 산란장을 제공하고 연안역의 영양염 공급에 중요한 역할을 한다. 전 세계의 울타리섬 중 약 30%는 삼각주가 발달하는 강 하구에 위치해 있다(Stutz and Pilkey 2001). 삼각주 지역에 발달하는 울타리섬의 형성에 기여하는 대표적인 요인들로는 하천 퇴적물의 풍부한 공급, 낮은 하상구배, 그리고 충분한 파랑에너지 등이며 이러한 요소들을 충족시키지 못하는 삼각주에서는 울타리섬이 발달되지 않는다(Stutz and Pilkey 2002). 그리고 일반적으로 국지 파랑(local wave), 조석 체계(tidal regime), 그리고 하천 유출(river discharge)의 특징에 따라 울타리섬의 형태가 결정된다(Hayes 1979).

낙동강 하구는 한국의 대표적인 삼각주 지형으로 울타리섬 및 사주의 발달이 양호한 지역이다(Fig. 1). 최근 하구역 주변에서의 인간 활동이 증가됨에 따라 1930년대에 건설된 녹산 수문을 비롯하여 1980년대 이후 낙동강 하구둑, 녹산·신호 공단, 신평·장림 산업단지, 명지지구 및 신행만 건설 등의 지속적인 연안개발로 인하여 낙동강 하구역 주변의 해안선들은 대부분 인공적인 형태를 나타내고 있다. 이러한 인위적인 변화들은 낙동강 하구에서의 해수와 물질 순환구조뿐만 아니라 하구 전면에 발달한 울타리섬 주변의 지형에도 많은 영향을 주었다(장과 김 2006; 김 등 2007). 장과 김 (2006)은 Landsat 이미지 자료와 현장에서 획득된 해수 특성 자료를 이용하여 낙동강 하구둑 건설 전과 후의 지형과 해수유동 및 해수 특성 변화에 관하여 분석하였다. 그들은 낙동강 하구 주변의 해안선이 점차 단순해졌으며 이로 인하여 사주와 등이 발달한다고 보고하였다. 또한 하구둑 건설 전에 조류가 해수 유동을 주도한 반면에 하구둑 건설 후에는 담수의 방류가 해수 유동을 주도하는 체계로 변화되었다고 제시하였다. 그러나 이러한 원격탐사 자료를 통한 분석은 수면 위로 드러나는 사주에만 해당되며 해저에 형성되는 사주의 지형 변화를 파악하는 데는 한계가 있다.

낙동강 하구에 발달한 울타리섬 주변의 해저 지형 변

화 특성을 파악하고자 많은 선행연구들이 수행되었다. 김 등 (2003)은 각 울타리섬의 해빈단면자료를 이용한 수치 해석기법을 도입하여 낙동강 하구역 주변 지역에서의 3차원적 지형변화를 예측하여 진우도와 도요등 전면에서의 퇴적이 상당량 발생했다고 보고하였다. 유 등 (2006)은 1927년부터 1995년까지 총 6개의 수치해도를 사용하여 진우도 전면에 발달한 사주가 연간 약 7.4 m씩 외해방향으로 전진한다고 제시하였다. 그리고 이러한 사주들의 면적이 낙동강 하구둑 건설에 의한 영향으로 1980년대 이후 급격한 증가를 보였다고 발표하였다. 이 등 (2007)은 진우도 전면에서의 단면수준측량을 통하여 수로의 매몰 및 천퇴가 급격히 발생하고 있으며 격년별 측량을 통하여 대체로 이런 현상이 하계 시(9~10월)에 발달하며 수심 감소 및 단면 변화폭의 증가를 보고하였다. 다수의 선행연구들에 의해 보고된 낙동강 하구역 울타리섬 주변의 급격한 지형 변화는 최근 항행로 폐쇄 및 협소화에 의한 소형선박의 해난사고를 일으키는 원인으로 작용한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 일환으로 준설 등이 시행되고 있으나 장기적으로 선박의 통행로 확보를 위한 근본적인 대책이 될 수 없다(정 등 2013). 따라서 지형 변화가 동반하는 위험요소를 해결하기 위한 근본적인 대응책 수립이 필요하며, 장기적인 관측을 바탕으로 한 정확한 예측의 필요성을 요구한다. 본 연구에서는 지난 2007년 3월부터 2012년 3월까지 약 5년간의 해저 지형 측량 자료를 이용하여 최근의 지형 변화 경향을 정량적으로 파악하였다.

2. 연구 지역 및 해황

낙동강 하구는 한국의 남동부에 위치하고 삼각주와 사주의 발달이 양호한 지역이다. 상류로부터 유입된 많은 양의 토사가 하류로 내려오다 수심의 감소와 유속의 약화로 퇴적되어 해안선과 평행한 크고 작은 사주의 형태를 형성하며, 파랑과 조류, 홍수 및 태풍 등에 의해 끊임없이 변화하고 있다(장과 김 2006). 그 결과, 현재 낙동강 하구역에는 진우도, 신자도 및 도요등과 같은 울타리섬과 장자도, 대마등, 백합등, 맹금머리등 같은 여러 규모의 사주들이 발달되어 있다. 연구 지역은 전반적으로 6 m 이하의 얕은 수심을 보이는 천해 지역이며 연구 지역 범위는 진우도와 신자도의 전면 해역 및 조류출입구 주변지역을 포함하며, 신자도 동쪽과 가덕도를 동서경계로 해안에서 약 2 km 떨어진 수심 약 5 m까지의 해역을 남쪽경계로 설정하였다(Fig. 1).

하구의 지형 변화 양상을 분석하기 위해서는 지형 변화에 영향을 미치는 외력 요인을 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 하구의 지형 및 울타리섬 주변 지형에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 낙동강 하구

Fig. 1. (A) Satellite image (taken on December 25, 2009) of the Nakdong River Estuary located in the southeastern Korea, showing the study area outlined with a dashed-dotted box and (B) Bathymetric survey lines in the study area

역의 파랑, 조석과 하천 유출의 특성을 알아보았다. 파랑은 퇴적물 수송을 일으키는 연안류(longshore current)를 형성하며 연안류의 크기 및 방향은 파고의 크기와 입사하는 파향의 각도에 의해 결정된다. 또한 파랑 및 파랑에 의해 생성된 연안류는 외부에서 유입되는 부유 물질 또는 뜬짐(suspended load) 뿐만 아니라 밑짐(bed load)을 재부유(resuspension)시키는 역할을 하기 때문에 퇴적물 이동에 중요한 역할을 한다(Dean and Dalrymple 2004).

연구 지역 내의 파랑의 특성을 파악하기 위하여 기상청에서 운용하는 거제도 해상부이(34° 46', 128° 54') 자료를 이용하였다. 거제도 부이는 낙동강 하구에서 정남방향으로 약 30 km 떨어진 곳에 위치하며 1시간 간격의 파향, 유의 파고, 파주기 등의 해상자료와 풍향, 풍속 등의 기상자료를 함께 제공한다(KMA 2012). 파랑특성 분석 결과, 연구 기간 내의 평균적인 파향은 하계(3~9월)에는 SW, SSW과 ENE 계열이 비등하게 우세한 반면, 동계(10~2월)에는 ENE, NE 계열이 탁월하였다(Fig. 2A). 연구기간 동안의 평균 유의 파고(significant wave height)는 약 1.06 m이며 월평균 유의 파고가 가장 높은 시기는 2010년 3월로 약 0.78 m로 나타나며 2007년 9월에도 약 0.75 m의 높은 유의 파고를 기록하였다(Fig. 2B).

낙동강 하구역에서 평균대조차는 1.66 m로(KHOA 2012) Davies and Moses (1964)의 분류법에 따라 2 m 이하의 소조차(micro tidal) 지역에 속한다. 연구 지역의 조류는 낙조류(ebb tidal current)시 남동 방향으로 남하하며 창조류(flood tidal current)시에 북서 방향으로의 흐름을 나타낸다(류와 장 1979; 장과 김 2006; 이 등 2008).

하구로 유입되는 퇴적물의 상당량은 인접한 하천에 의해 공급된다. 따라서 연구 지역내의 퇴적물 유입량을 파악하고자 한국수자원공사(K-water)에서 운용하는 낙동강 하

Fig. 2. (A) Rose diagram of incident waves in summer (left) and winter (right) seasons. (B) Time series of daily (gray: DSWH) and monthly (black: MSWH) significant wave height from 2007 to 2012 at the Geojedo buoy (KMA 2012). (C) Total daily (gray) and monthly (black) water discharge from 2007 to 2012. (D) Monthly suspended sediment concentrations (SSC) measured at the Nakdong River Barrier from 2007 to 2012 (K-water 2012)

구독 수문에서 관측된 하천 유출량 및 부유토사농도 (suspended sediment concentration) 자료를 이용하였다(K-Water 2012). 대체로 하천 유출량은 유출량이 많은 풍수기(7~10월)와 유출량이 적은 갈수기(11~6월)로 구분된다(Fig. 2C). 연구 기간내의 일평균 최대 방류량은 약 19,165 CMS(m^3/sec)로 2011년도 하절기에 나타났다. 월평균 최대값은 2007년 하절기에 5,812 CMS로 가장 높은 값을 기록했으며 2009년 하절기에 3,924 CMS, 2011년 하절기에 3,650 CMS의 순으로 나타났다. 부유물질 농도는 2007년 풍수기에 약 73 mg/L로 최대 농도를 기록했으며 특히 2010년 9월부터 2012년 9월까지는 다른 해에 비하여 계절에 상관없이 지속적으로 높은 농도가 관측되었다(Fig. 2D). 본 연구에서는 하천에 의해 유입되는 토사 유출량을 하천 유출량과 부유토사농도의 곱으로 계산하였다.

3. 자료 및 방법

수심 및 지반고 측량 자료

진우도와 신자도 주변에서의 지형 변화를 파악하기 위하여 2007년 3월부터 2012년 2월까지 총 12회의 수심 및 지반고 측량을 실시하였다(Table 1). 측량 정선은 진우도 및 신자도 전면의 N-S 측량 정선과 눌차도와 진우도, 진우도와 신자도 사이에 존재하는 조류출입구 주변 지역에 각각 6개의 E-W 측량 정선을 설정하였다(Fig. 1). 각각의 측량 정선간 이격 거리는 동서 방향으로 대략 100~400 m이며, E-W 측량 정선은 남북 방향 200 m로 설정되었다.

측량 방법은 수심 측량과 지반고 측량으로 구분되어 수행되었다. 수심 측량은 선박을 이용하였고 정확도가 약 0.5 m인 Hemisphere사에서 제작된 DGPS(Differential Global Positioning System) 수신기를 이용하여 실시간으로 선박의 위치를 조정하였으며 측량 정선을 따라 소나테

크(주)사에서 제작된 천해용 음향측심기(Echo-sounder)인 AquaRuler 200D를 사용하여 수심을 측량하였다. 정확한 측량을 위해 주측량 정선은 왕복으로 실시되었으며 측량 시 측량 정선에서 좌우 5 m 간격의 오차범위를 벗어나지 않게 하였다. 오차 범위를 벗어날 경우, 범위 내의 자료를 얻을 때까지 재측량을 실시하였다. 조업 중인 선박이나 어망이 측량 정선 상에 위치할 경우 접근할 수 있는 주변 지역에서의 수심을 측량하여 선형 보간법에 의해 측량 정선상의 수심을 도출하였다. 육상 측량은 수심측량 측량 정선의 연장선상에서 실시하였으며 HUACE사의 RTK(Real Time Kinematic) 방식의 정밀 DGPS를 이용하여 1초 간격의 지반고 자료를 획득하였다. RTK 방식은 정밀한 위치를 확보한 기준국(base station)과 이동국(rover) 간의 오차 보정치를 이용하여 수평·연직 방향으로 2~3 cm의 정확도를 유지하는 측량치를 얻을 수 있다. RTK 측량을 위해 사용된 기준점은 진우도와 신자도에 각각 1개소가 설치되어있으며 부산신항만주식회사에서 시행한 측량 성과로 한국해양과학기술원으로부터 제공받은 것이다(부산지방해양항만청 2010).

결측구간없이 연속적인 해빈단면자료를 확보하기 위하여 대조기의 만조 시에 수심측량을, 간조 시에 지반고 측량을 실시하였다. 선박을 이용한 수심 측량은 가능한 해안에 가까이 접근하였으며, 도보로 시행된 지반고 측량은 그 시간대의 해수면 이하 고도까지 측량을 실시하여 수심 및 육상 측량 자료간의 이격이 발생하지 않게 하였다. 또한 지반고 측량 시, 해안선 및 등수심선을 추출하는데 용이하도록 해안을 따라 아래로는 해수면 이하의 고도에서부터 위로는 식생이 존재하는 고도까지 지그재그 형식으로 측량이 이루어졌다. 수심 측량은 수중 음속을 1500 m/s로 고정시켜 수행하였으며 음속의 차이에 의해 발생하는 오차를 제거하기 위하여 매 측량 시기마다 현장에서 barcheck 판을 이용한 음속 보정을 실시하였다. 또한 조석의 영향을 배제하기 위하여 국립해양조사원의 가덕도 조위검조소에서 제공하는 조위자료를 이용하여 조석 보정을 실시하였다(KHOA 2012). 결과적으로 모든 수심 및 지반고 자료는 가덕도의 약취저지조면(App. LLW)인 기준면(Datum Level)을 기준으로 정리하였으며 수심은 음의 값, 지반고는 양의 값으로 나타내었다.

지형 변화율 산정을 위한 수치수심 분석법

진우도 및 신자도 주변 해역의 지형 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 USGS(U.S. Geological Survey)에서 제공하는 수치해안선 분석 시스템(Digital Shoreline Analysis System; DSAS)에서 이용되는 지형 변화를 산정하는 통계 값 4가지(SCE, NSC, EPR, LRR)를 계산하였다(Thieler et al. 2009). DSAS의 방법에 따라 본 연구에서는 기준선

Table 1. Summary of the surveys in this study

No.	Surveyed date
1	2007/03/02; 03/04
2	2007/09/28-29
3	2007/12/23-25; 2008/01/05
4	2008/02/20-21; 02/23
5	2008/07/04-06
6	2008/12/27-29
7	2009/09/05-07; 09/09
8	2010/02/28; 03/17-18
9	2010/08/25-26; 09/10
10	2011/02/19-20; 03/04
11	2011/08/29; 09/13; 09/15
12	2012/02/21-22; 03/09

(baseline)과 측정선(transect)을 사용하며 각 시기의 해변 단면선과 측정선이 만나는 교점들의 거리 변화를 통계적인 기법으로 분석하여 해안선의 이동을 정량적으로 계산한다. 기존의 DSAS에서 사용하던 통계적 수치인 SCE (Shoreline Change Envelope)는 주어진 위치에서 기준선과의 이격 거리가 가장 큰 시기의 해안선과 가장 작은 시기의 해안선 사이의 거리를 나타내며 NSM(Net Shoreline Movement)은 가장 오래된 해안선과 가장 최근 해안선 사이의 거리를 나타낸다. EPR(End Point Rate; 순 해안선 변화율)은 단순히 NSM(Net Shoreline Movement)을 시간으로 나눈 값이며 LRR(Linear Regression Rate; 선형회귀 해안선 변화율)은 최소자승법을 통한 변화율을 산정하는 방법이다. 기존의 DSAS는 해안선 자료를 이용한 통계분석 시스템이지만 본 연구에서는 해안선 대신에 수심 측량 자료를 사용하므로 몇 가지 용어의 수정이 불가피하였다. 따라서 SCE는 최대 수심변화량(Depth Change Envelope; DCE)으로 NSM은 순 수심변화량(Net Depth Change; NDC)으로 각각 대체하며 EPR과 LRR은 순 수심변화율, 선형회귀 수심변화율로 그대로 사용하였다.

Fig. 3은 각각의 통계값의 정의를 설명한다. DCE는 가장 큰 지형 변화 범위를 나타내며 일시적인 현상에 대하여 영향을 크게 받는다는 단점이 있고 전반적인 변화 양상을 나타내지는 않는다. NDC는 일정한 위치에서의 최근 측량된 수심과 최초 측량된 수심 사이의 깊이 차를 지시한다. DCE가 양의 값만을 가지는 것과는 달리 NDC는 최초 수심에 비해 최근 수심이 퇴적되어 알아질 경우 양의 값을, 침식되어 깊어질 경우 음의 값을 가지게 되며 이는 곧 침식량 및 퇴적량을 지시한다. NDC는 과거에 비해 현재의 상태를 파악할 수 있는 장점을 지니지만 시간적으로

Fig. 3. Definition of four statistical variables to represent quantities and rates of the change in depth. For the explanations of the acronyms, see the text

양 끝 값, 즉 최초 측량 값과 최근 측량 값 2개의 값만으로 표현한 것이므로 기간 내에 발생한 특정 사건의 영향이 배제된다는 단점을 가지고 있다. EPR은 NDC를 시간으로 나눈 값이므로 NDC와 유사한 의미를 지니며 변화량을 나타내는 NDC와는 다르게 변화율을 나타낸다. LRR은 시간에 따른 각 측량된 수심들에 대하여 최소자승법을 사용하여 산정된 추세선의 기울기이다. LRR은 모든 측량 값들을 통하여 산출된 것으로 기간 내의 변화를 잘 반영하고 있으나 이례적이며 일시적인 사건에 노출될 경우, 전반적인 양상 분석에 대한 왜곡된 결과가 도출된다는 단점이 있다.

경험적 직교 함수법(Empirical Orthogonal Functions Analysis)

낙동강 하구의 울타리섬 주변 지역에 발생하는 지형 변화를 지배하는 시·공간적인 구조를 파악하기 위하여 경험적 직교 함수법(Empirical orthogonal functions analysis; 이하 EOF 분석법)을 이용하였다. EOF 분석법은 Lorenz (1956)가 기상 예측을 위해 처음으로 도입한 방법이며, 오래 전부터 기상학, 지리학 같은 여러 과학 분야에서 많이 사용되었다(Kutzbach 1967). EOF 분석법은 시·공간 변동 자료의 변동 양상을 분석하는 방법 중에 하나로 고유값에 따른 고유벡터와 시간계수로 분석할 수 있다. 고유값은 각 모드에 대한 비중, 고유벡터는 각 고유값을 갖는 변동에 대한 공간분포, 고유값과 고유벡터의 시간 변동 양상을 나타내는 시간계수로 구분할 수 있으며 이러한 각 고유값에 따른 고유벡터와 시간계수를 통틀어 모드(mode)라 일컫는다. 이는 복잡한 시·공간적인 구조를 포함하는 자료의 해석을 분석결과인 모드로 가능하게 하며 두 가지 측면에서 유용하다. 첫째, 몇 개의 주요 모드만으로도 전체 변동의 상당 부분을 설명할 수 있으며, 둘째로 각각의 모드는 서로에 대하여 독립적이기 때문에 각각의 독립적인 요인과 연관지어 해석될 수 있다(Kaihatu et al. 1998).

Winant et al. (1975)는 California의 Torrey Pines Beach에서 측량된 해변단면 자료에서 산출된 고유벡터를 이용하여 EOF분석을 수행하였다. 그들은 각각의 모드가 지니는 의미를 파악하고 이러한 방법이 향후 해변단면자료를 분석하는데 적합할 것으로 보고하였다. 이외에도 동일한 형태의 자료를 이용한 많은 연구들이 수행되었으며(Tsuchiya et al. 1982; Pruszk 1993; Barletta et al. 2004), 중앙 해령(Small 1994) 및 사구(Burgh et al. 2009) 같은 특정한 지형 구조의 변화 특성을 분석하는데 적용되기도 하였다.

본 연구에서는 EOF 분석법을 이용하여 연구 지역내의 지형 변화를 지배하는 시·공간적인 구조를 찾아내고 특징을 비교 분석하였다.

4. 결과 및 토의

수치수심 분석법에 의한 진우도와 신자도 주변 지형 변화 양상

낙동강 하구의 진우도와 신자도 주변에서 획득된 수심 및 지반고 측량 자료를 이용하여 계산된 4가지 통계수치의 분포도와 대표값을 각각 Fig. 4에 나타내고 Table 2에 정리하였다.

DCE(최대 수심변화량)는 퇴적과 침식을 나타내는 통

계값이 아니며 단순히 변화하는 범위의 크기를 나타낸다. 따라서 항상 양의 값을 가지게 되며 단위는 m로 표기된다. DCE의 최대값은 가덕도 주변 해역(487.12 km E, 3879.94 km N)에서 2.62 m로 나타났으며 진우도와 신자도 사이의 수로 동측(489.24 km E, 3879.74 km N 주변)과 신자도 동쪽 부분의 해안 부근(491.34 km E, 3879.22 km N 주변), 그리고 신자도 동쪽 부분의 남단 해역(491.94 km E, 3878.72 km N 주변)에서도 2 m 이상의 높은 값을 보인다. 이와 같이 DCE의 높은 값은 지난 5년간 이들 지역에

Fig. 4. Distribution of four statistical variables (DCE, NDC, EPR and LRR) in the study area. The coastlines of barrier islands are taken from nautical charts published by Korea Hydrographic and Oceanographic Administration in 2004. DCE (Depth Change Envelope) represents a range of change and NDC (Net Depth Change) denotes the difference between the most recent and the oldest data. EPR (End Point Rate) is a rate of morphological change which has been calculated using the initial and final survey data and LRR (Linear Regression Rate) means the slope that was calculated by the linear regression analysis

Table 2. Representative values of four statistical variables (DCE, NDC, EPR, LRR) calculated from the bathymetric survey data

Representative value	DCE (m)	Representative value	NDC (m)	EPR (m/yr)	LRR (m/yr)
maximum	2.62	maximum positive	2.14	0.43	0.46
minimum	0.19	maximum negative	-1.15	-0.23	-0.21
mean	0.80	mean	0.22	0.05	0.05

서 활발한 지형 변화가 발생하였음을 의미한다. DCE의 최소값은 진우도와 신자도 사이의 수로 말단(488.18 km E, 3879.32 km N)에서 0.19 m로 나타나며 연구 지역의 전체 평균값은 약 0.80 m이다. NDC(순 수심변화량)는 DCE와는 다르게 시간이 포함된 통계값이기 때문에 양의 값은 퇴적을 그리고 음의 값은 침식을 의미한다. NDC의 양의 최대값(maximum positive), 즉 최대 퇴적이 발생한 곳은 가덕도 주변 해역으로 2.14 m로 기록되었고, 진우도와 신자도 사이의 수로 동측 및 신자도 동쪽 부분의 남단 해역에서도 약 2 m 이상의 높은 퇴적을 나타낸다. 가덕도 주변 해역에서의 NDC와 DCE는 각각 양의 최대값을 보이며 이는 가덕도 주변 해역에서 큰 침식 없이 지속적인 퇴적이 진행되었음을 의미한다. 최대 침식을 의미하는 음의 최대값(maximum negative)은 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 -1.15 m로 발생하였으며 전체 평균은 0.22 m로 나타난다. DCE의 최소값은 진우도와 신자도 사이의 수로 말단에서 나타나지만 NDC의 음의 최대값은 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 나타난다. DCE가 최소로 나타나는 지역은 변화가 거의 없었던 지역을 의미하지만 NDC가 음의 최대값을 나타난 지역은 최대 침식이 발생한 지역을 의미한다.

EPR(순 수심변화율)은 지형변화율을 나타낸 것으로 속도의 개념으로 사용되며 EPR은 단지 NDC를 시간으로 나눈 것이므로 NDC와 분포 양상이 거의 동일하다. NDC가 가장 높게 나타난 가덕도 주변 해역의 EPR은 0.43 m/yr이며 최대 침식을 나타낸 신자도 동쪽 부분의 해안 부근은 -0.23 m/yr의 EPR 값을 보인다. 이 외에도 진우도와 신자도 사이의 수로 동측 및 신자도 동쪽 부분의 남단 해역에서 약 0.40 m/yr 이상의 상대적으로 높은 퇴적률을 보였으며 진우도와 신자도 사이의 수로 서측(488.86 km E, 3879.72 km N 주변)에서 약 -0.20 m/yr 이하의 침식률이 측정된다. LRR(선형회귀 수심변화율)의 양의 최대값은 0.46 m/yr로 EPR과 동일하게 가덕도 주변 해역에서 나타났으며 최대 침식률을 의미하는 음의 최대값 또한 EPR과 동일한 지역인 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 -0.21 m/yr로 나타났으며 평균값은 0.05 m/yr로 EPR과 거의 유사하다. LRR은 EPR과 분포 양상면에서도 유사한 형태를 나타내는데, LRR은 측량 시작과 끝 시점의 자료만을 사용한 EPR과는 다르게 모든 측량 시점의 자료를 사용하는 통계값이다. 따라서 EPR이 측량 기간 내의 돌발적인 사건을 반영하지 않지만 LRR은 측정 기간 내의 모든 변화를 반영하게 된다. 따라서 EPR과 LRR은 다른 양상을 나타낼 수 있다. 그러나 이 연구에서는 EPR과 LRR이 서로 유사한 분포 양상으로 나타나며 이러한 결과는 측량 기간 내의 돌발적인 사건에 의한 변화가 드물었고 꾸준한 양상으로 지형 변화가 발생한 것으로 해석된다.

수치수심 분석 결과를 통하여 연구 지역 내의 전반적인 지형 변화 경향은 퇴적 양상이 침식 양상에 비하여 약간 우세하게 나타났으나 지역적으로 차이가 발생함을 볼 수 있다. 퇴적 양상을 나타내는 대표적인 지역은 ① 가덕도 주변, ② 진우도와 신자도 사이의 수로 동측 그리고 ③ 신자도 동쪽 부분의 남단 해역을 들 수 있으며, 침식 양상은 ④ 신자도 동쪽 부분의 해안 부근, ⑤ 진우도와 신자도 사이의 수로 서측 해역에서 탁월하게 나타났다. 신자도 동쪽 부분의 남단 해역(③)의 퇴적 양상은 신자도와 도요등 사이에 존재하는 조류출입구와 연관된 것으로 보이나 이 연구에서는 해당 지역을 포함하고 있지 않기 때문에 관련된 지역의 지형 변화 양상에 대한 분석은 추가 자료가 요구된다. Fig. 5는 EPR과 LRR의 양의 최대값과 음의 최대값이 나타난 가덕도 주변(①)과 신자도 동쪽 부분의 해안 부근(④)에서의 수심 변화를 시계열로 각각 나타낸 것이다. LRR의 양의 최대값이 나타나는 가덕도 주변 해역은 전반적으로 수심이 높아지는 양상을 나타내며 2009년까지는 급격한 증가와 감소를 반복하였으나 2009년 이후로는 미미하게 증가한다. 음의 최대값이 나타나는 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서도 2008년 7월 이례적인 수심 증가를 보이긴 했으나 전반적으로 미미하게 깊어지는 양상이 나타났다. 따라서 두 지역 모두 2008년 2~7월경에 돌발적인 사건이 발생했음을 시사한다. 2~7월경에 약 2 m 정도의 침식을 일으킬 수 있는 대표적인 요인으로는 태풍을 들 수 있으나 동일 시기에 이례적인 파랑은 존재하지 않았다

Fig. 5. Variability of the altitude within 100 m radius of (A) the positive maximum and (B) negative maximum of LRR from 2007 to 2012. The solid line (black) represents the linear regression of mean. The blue boxes indicate the position of first quartile (75% of data) to third quartile (25% of data). The red cross is an outlier whose number is more than 1.5 times of upper quartile

(Fig. 2B). 따라서 이러한 결과는 자료를 획득하는데 있어 발생할 수 있는 aliasing 현상에서 기인한 것으로 생각된다. 낙동강 하구역의 방류는 평균적으로 7월부터 10월에 집중되는데 본격적인 방류가 시작되기 직전에 측량된 자료이므로 10월 이후의 환경에 오랜 시간 노출되어 일반적으로 2월과 9월경에 획득된 자료와 특별한 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

NDC, EPR과 LRR의 결과에서 진우도와 신자도 사이에 위치한 수로 주변(②, ⑤)은 수로와 나란한 형태로 동측과 서측이 상반된 지형 변화 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 수로 축의 변화와 관련이 있다. 수로 축의 변화와 수로 주변의 변화 양상과의 관계를 알아보기 위하여 LRR의 경향과 측량 정선에서 나타난 수로의 최대 수심의 위치 변화를 중첩하여 나타내었다(Fig. 6). 계절적인 변화를 제외하고 하천의 영향을 최대한 배제하기 위하여 갈수기(11월~6월)의 자료만을 사용하였다. 동서 방향의 측량 정선에서 관측된 최대 수심 위치는 변화율의 차이는 있으나 모두 서쪽으로 이동한다. 가장 북쪽에 위치한 동서 방향의 측량 정선에서의 최대 수심 위치는 4.47 m/yr의 속도를 나타내며 가장 외해 방향에 위치한 동서 방향의 정선에서의 속도는 16.27 m/yr이다. 남북 방향의 측량 정선에서의 최대 수심 위치가 모두 북쪽으로 이동하는 것을 고려하면 수로의 축은 북서 방향으로 이동하는 것으로 보이며 변화율 차이에 의해 한 지점을 중심으로 회전(pivoting)하는 현상으로 나타난다. 연구 지역의 수로 축의 변화를 일으키는

주요 요인으로 연안류의 영향을 들 수 있다. 연안류와 퇴적물의 이동 방향은 일반적으로 입사하는 파랑의 방향에 따라 결정된다(Miles et al. 2000; Van Lancker et al. 2004). 연중 ENE 계열의 파랑이 우세한(Fig. 2A) 낙동강 하구는 지형적인 조건에 의하여 다대포의 외해에서 북서 방향으로 들어오는 파랑을 생성시킨다(김 등 1995). 북서 방향으로 접근하는 파랑은 해안에서 서쪽 방향의 연안류를 생성한다. 연안류에 의한 연안수송 체계(littoral system)는 조류출입구에 퇴적물을 공급하여 수로의 안정성(stability)에 영향을 미친다(Oertel 1988). 연안류에 의해 이동하는 퇴적물이 조류출입구에 도달하면 조류출입구를 유통하는 흐름이 연안수송을 제한하게 된다. 따라서 조류출입구의 수로와 연안류가 만나는 수로 한쪽 면에 집중적인 퇴적을 일으키며 수로를 메우기도 한다(Fitzgerald 1982). 그 결과 진우도와 신자도 사이의 수로 동측에 수로와 평행한 형태의 퇴적체를 형성한 것으로 보인다. 퇴적물에 의하여 수로의 수심이 낮아지거나 수로의 폭이 좁아지게 되면 기존에 유통되던 유량을 보존하기 위하여 반대쪽에 침식이 발생하고 수로의 축은 변하게 된다. 이러한 과정이 진우도와 신자도 사이 수로의 동·서측의 상이한 지형 변화 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

조류출입구 주변의 퇴적 양상 분석

조류출입구 전면에 존재하는 수로의 이동 및 변화는 주변 지역의 퇴적 양상을 변화시키는 주된 요인으로 작용한다. 또한 수로의 이동 및 변화는 기존의 수로를 고려하여 통행하는 선박들에게는 위협요소로서 작용하며 연안역의 준설 및 개발을 시행하는데 있어서 반드시 고려되어야 하는 중요한 사항이다(Castelle 2007; Kraus 2002).

수치수심 분석법 결과에서 나타난 진우도와 신자도 사이의 수로 축의 변화와 관련하여 주변 지역의 퇴적 양상의 변화를 정성적으로 분석하기 위하여 해당 지역을 0.2 m 간격의 등수심도로 제시하였다(Fig. 7). Fig. 7의 결과는 Fig. 6에서 사용된 자료와 동일한 자료를 이용하여 나타낸 것이다. 2008년 2월 수로의 끝부분에 존재하는 섬 형태의 사주(488.20 km E, 3879.30 km N 부근)는 진우도 전면의 사주와 결합되지만, 신자도 서쪽 부분의 전면에 사취(sand spit)의 형태로 발달한 사주는 점차 외해방향으로 뻗어나가게 성장한다. 2008년 12월 신자도 전면의 사취는 지속적으로 성장하고 진우도 전면 해역의 퇴적지는 수심이 낮아지고 점차 외해방향으로 확장된다. 2010년 3월, 진우도 전면의 퇴적지는 계속해서 확장되지만 신자도 전면의 사취는 일부분이 절단되는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 월류(spill-over)에 의해 발생한 것으로 판단된다. 수로의 축이 변하게 되면 기존의 수로를 왕복하던 조류의 유통이 원활하지 않기 때문에 대조시의 낙조류나 하천 유

Fig. 6. Trough migration in subtidal channel in front of the Jinwoodo from 2007 to 2012 (the data measured in winter season were used). The numbers and arrows represent the net movement rates (unit: m/yr) and directions of each site, respectively

Fig. 7. Changes of bathymetric contours in the vicinity of a subtidal channel between Jinwoodo and Sinjado in winter season. Note that a sandbar on the eastern flank of the channel was cut into two portions with the seaward portion merged with the shallow platform to the left of the channel and with the remaining portion growing seaward. The thick arrows and the white dashed lines indicate the direction of movement or growth of sandbar and the location of channel trough, respectively

출, 폭풍해일(storm surge) 등과 같은 요인에 의해 수로 주변에 퇴적지형에서 사주의 두께가 얇고 함수율이 높은 퇴적물 지역에서 월류가 발생하게 된다(Davis and Fitzgerald 2004).

월류가 발생한 시기(2009년 9월~2010년 3월)는 하천 유출이 집중되는 풍수기(7월~11월)를 포함하기 때문에 조류출입구를 통한 유출에 의해 발생했을 것으로 예상된다. 따라서 월류가 발생한 곳에서는 새로운 수로가 형성되고 기존에 존재하던 수로는 퇴적에 의하여 메워지는 결과가 나타난다. 2010년 3월부터 수로 축의 변화율이 이전보다 증가하기 시작했으며 이는 위와 같은 수로의 재배치와 관련된 것으로 생각된다(Fig. 6). 2010년 3월, 신자도 전면의 사취에서 잘려나간 사주 덩어리(488.80 km E, 3879.30 km N 부근)는 2011년 2월에 서쪽으로 이동하여 진우도 전면 해역의 퇴적지에 결합되어 더 넓은 퇴적지를

형성하였다. 이러한 사주 덩어리가 수로의 서쪽(진우도 전면)으로 이동하는 것은 퇴적물 우회 과정(bypassing process)과 관련된다. 퇴적물 우회과정은 수로를 중심으로 한 울타리섬 전면에서 퇴적물이 조류출입구를 통과하여 반대쪽 울타리섬 전면 해역의 퇴적지로 이동하는 과정을 의미한다. 퇴적물의 우회는 1) 파랑에 의한 직접적인 이동, 2) 조석에 의한 교환, 3) 사주의 이동 혹은 수로의 변화(shifting)와 같은 요인들에 의해서 발생한다(Bruun and Gerritsen 1959; Fitzgerald 1982). 따라서 진우도와 신자도 사이의 수로 변화에 따른 퇴적물의 이동이 진우도 전면의 퇴적지 규모의 지속적인 증가에 기여한 것으로 생각된다. 이와 같은 과정이 반복적으로 발생할 경우 진우도 전면의 퇴적은 심화될 것으로 예상하며 이러한 과정이 일시적 혹은 반복적인지 명확히 판단하기 위해서 장기적인 관점으로 검토할 필요성이 있다.

시간계수를 Fig. 8에 나타내었다. 각 모드의 공간분포는

정규화(normalization)된 고유벡터의 값으로 나타내었고
고유벡터의 절대값이 0.01인 곳의 경계선을 표시하여 각

Fig. 8. First three eigenvectors (left) and the related time coefficient (right) during the period of 2007~2012. The black lines of left figure indicate the areas showing an absolute value larger than 0.01

모드 별로 다른 지역에 비해 해당 모드의 영향을 크게 받은 지역을 구분하였다. 이 연구에서는 전체 변화에 대한 비중이 10% 이상의 모드만을 비교 분석하였다.

제 1 모드는 전체 변화의 약 48.7%를 차지한다. 공간분포는 대체로 연구 지역의 서쪽에서 높은 값을 나타내며, 특히 가덕도 주변 해역과 진우도와 신자도 사이의 수로 동측에서 양의 높은 값을 보인다. 진우도 남쪽 해안 부근과 진우도와 신자도 사이의 수로 서측에서 음의 높은 값을 나타내지만 절대적인 크기는 양의 값에 비해 상대적으로 작다(Fig. 8A). 시간계수는 2007년 9월부터 2008년 7월에 급격한 감소가 나타나지만 전반적으로는 지속적인 증가를 보인다. 제 1 모드는 전체 변화의 거의 50%를 차지하기 때문에 시간계수가 증가하면서 공간분포가 양의 값을 나타내는 지역은 퇴적을 나타내고 음의 값을 나타내는 지역은 침식이 나타나는 것으로 해석될 수 있다. 그러므로 가덕도 주변 해역 및 진우도와 신자도 사이의 수로 동측은 퇴적이 진행되는 양상을 그리고 진우도 남쪽 해안 부근과 진우도와 신자도 사이의 수로 서측은 침식이 진행되는 양상을 나타낸다. 이러한 결과는 수치수심 분석법의 EPR과 LRR의 결과와도 동일하며 연구 지역에서 발생한 주요한 지형 변화는 제 1 모드와 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다.

제 1 모드는 공간분포가 대체로 서쪽에서 높고 수로 주변에서 동·서측의 상반된 양상을 나타내고 시간계수가 점차 증가하는 것을 미루어 보아 지속적으로 동에서 서로 이동하는 퇴적물에 의해 나타난 결과로 판단된다. 윤 등 (2008)은 낙동강 하구역 토사의 순환 양상을 파악하기 위하여 2007년부터 2008년까지 약 3개월 간격으로 최대간격 1 km의 조밀한 격자상의 표층퇴적물 입도 분석을 통하여 퇴적물의 분포 특성을 분석하였다. 윤 등 (2008)의 결과에 의하면, 낙동강에서부터 유출되는 니질 퇴적물은 주로 외해쪽으로 운반되지만 사질 퇴적물은 근해에 침강하고 연중 우세한 ENE 계열의 입사파랑에 의해 진우도 전면 및 가덕도 방향으로 이동하며, 이러한 현상은 이번 연구 결과와 매우 유사하다. 또한, 이 등 (2004)은 낙동강 하구역 내에 유입하는 부유 퇴적물 및 재부유되는 퇴적물의 거동을 파악하기 위하여 방향성을 고려한 현장포집실험을 실시하였다. 실험 결과에 의하면 진우도 부근의 정점들에서 퇴적이 상대적으로 크게 나타났고 신자도 전면의 수심 약 5 m 지점의 정점에서 서쪽 방향의 거동이 가장 우세한 것으로 관찰되었다. 인접한 지역에서 장과 김 (2006)은 유속계를 사용하여 12시간 수심별 유속 분포 관측을 수행하여 저주파 통과 필터(low-pass filter)를 이용한 잔차류(residual current)를 산출하였다. 그 결과 표층에서부터 수심 1 m까지는 담수와 혼합에 의해 남서 방향의 흐름이 우세하고 이하의 층에서는 북서 방향의 흐름이 우세한 것

을 관찰하였다. 일반적으로 부유사는 저층과 중층을 통해서 수송된다(김 등 2003; 이 등 2008). 따라서 진우도 지역에서 수심 1 m 이하의 잔차류 흐름은 전반적으로 북서 방향으로 발생하기 때문에 부유물질 및 밀집은 북서쪽으로 지속적으로 이동하여 가덕도 주변 해역과 수로 주변의 지형 변화에 영향을 미친다는 제 1 모드의 결과를 반영한다.

제 2 모드의 비중은 약 16.6%이며 공간분포는 대체로 양의 높은 값이 신자도 전면에서 동-서 방향으로 넓게 분포하며 진우도와 신자도 사이의 수로의 방향과 나란하게 길고 좁은 형태로 나타나며, 가덕도 주변과 수로 동측에는 산발적으로 음의 높은 값을 나타낸다(Fig. 8B). 시간계수는 대략 4년을 주기로 증가와 감소가 반복되지만 전반적으로는 감소하는 경향을 나타낸다. 신자도 전면은 제 1 모드의 공간분포가 그리 높지 않게 나타나기 때문에 제 2 모드의 영향을 상당히 받았을 것으로 보인다. 그러므로 양의 높은 값을 나타내는 곳은 두 차례(2007년 9월~2008년 2월, 2010년 2월~2011년 9월)의 퇴적이 발생하였으며 나머지 기간에는 침식이 발생한 것으로 볼 수 있다. 공간분포가 음의 높은 값을 나타내는 가덕도 주변 해역이나 수로 동측에서는 정반대의 현상이 발생한다. 시간계수는 결과적으로 감소하는 양상을 나타내기 때문에 양의 값을 가지는 지역은 수심이 깊어졌으며 음의 값을 나타내는 지역은 수심이 얕아졌다. 제 2 모드의 시간계수와 몇 가지 외력 요인과의 관계를 비교한 결과, 낙동강의 토사 유출량과 가장 밀접한 관련이 있는 것으로 파악되었다(Fig. 9). 낙동강의 토사 유출량은 낙동강 하구둑 방류량 자료와 부유물 질농도의 곱에 의해 계산되었으며 제 2 모드의 시간계수와 상관관계수 0.73의 매우 유사한 양상을 보여준다. 이러한 상관성은 낙동강에서 유출되는 퇴적물이 일차적으로 신자도 전면과 진우도와 신자도 사이의 수로 서측의 퇴적에 영향을 주는 것을 의미한다. 낙동강에서 유출되는 대부분의 사질 퇴적물들은 하구에 퇴적되며 조류에 의해 동-서 방향의 길고 좁은 퇴적체를 형성하게 된다(Lee et al. 2006). 따라서 제 2 모드의 공간분포가 신자도 전면에서 동서 방향의 길고 좁은 형태로 높게 나타나는 것으로 판단된다(Fig. 8B).

제 3 모드는 전체 변화의 약 11.3%를 설명하며 공간분포는 가덕도 주변 해역과 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 높은 값을 나타낸다. 시간계수는 측량 초기, 급격한 변화가 나타나지만 전반적으로 감소하는 경향을 보이기 때문에 제 3 모드는 가덕도 주변 해역과 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 침식의 요인으로 작용한다. 가덕도 주변 해역은 제 1 모드의 공간분포가 상당히 높은 지역이기 때문에 제 3 모드의 영향은 미약한 것으로 생각된다. 그러나 신자도 동쪽 부분의 해안 부근은 제 1 모드와 제 2 모

Fig. 9. Comparison between the second time coefficient and mean amounts of suspended solid discharge from the Nakdong River. Correlation coefficient (0.73) indicates the close relationship between two factors

드의 공간분포가 0에 근접하기 때문에 두 모드의 영향은 미미한 반면 제 3 모드의 공간분포는 높기 때문에 제 3 모드의 영향이 크게 나타날 것으로 보인다. 낙동강 하구의 항공사진에서 해안선 자료를 추출하여 수치해안선분석시스템을 이용한 장기간의 해안선 변화율이 산정되었다(김 등 2007; 정 등 2013). 김 등 (2007)은 1975년부터 2001년까지 진우도의 동쪽 끝 부분의 해안선은 일정한 간격으로 후퇴하며 나머지 부분에서의 변화는 미약하다고 발표하였다. 반면에 신자도의 서쪽 끝 부분은 외해 방향으로 전진하지만 동쪽 끝 부분은 육지 방향으로 후퇴한다고 하였다. 정 등 (2013)은 1996년부터 2009년까지 진우도의 서쪽 부분은 -1.9 m/yr로 육상 방향으로 후퇴하며 남쪽 부분은 6.7 m/yr, 동쪽 부분은 2.1 m/yr로 외해 방향으로 전진하며 신자도 서쪽 부분은 0.6 m/yr, 동쪽 부분은 -16.0 m/yr로 각각 전진과 후퇴를 보인다고 발표하였다. 이러한 연구 결과는 신자도의 동쪽 부분이 육지 방향으로의 후퇴를 나타내며 신자도의 다른 부분에 비해 동쪽 부분이 상대적으로 빠른 속도로 후퇴함을 보여준다. 결과적으로 신자도의 동쪽 부분이 후퇴함에 따라 동쪽 부분의 전면 해역 수심이 점차 깊어지게 되며 이러한 결과는 제 3 모드의 공간벡터가 신자도 동쪽 부분의 해안 부근에서 높게 나타나는 결과와 매우 밀접하다.

5. 결 론

최근 하구 지역에서 인위적인 개발에 따른 지형 변화가 심화되고 있다. 지형 변화는 주변 지역의 양식장을 파괴하고 선박 통행을 방해하는 요소로 작용하기 때문에 적절한

대응책을 수립하기 위해서는 지형 변화에 대하여 장기적이고 정확한 연구가 필요하다. 본 연구는 2007년 3월부터 2012년 2월까지 진우도와 신자도 주변의 측량 정선 상에서 수심 및 지반고 측량을 통해 획득된 자료에 수치수심 분석법과 EOF 분석법을 적용하여 정량적인 지형 변화 양상을 살펴보고 지형 변화의 시·공간적인 구조를 파악하였다.

수치수심 분석법으로부터 계산된 4가지 통계수치(DCE, NDC, EPR, LRR)을 이용하여 진우도와 신자도 전면의 지형 변화 양상을 파악한 결과 DCE(최대 수심변화량)는 가덕도 주변 해역에서 최대 2.62 m로 나타나며 연구 지역내의 전체 평균은 0.80 m로 나타난다. NDC(순 수심변화량), EPR(순 수심변화율)과 LRR(선형회귀 변화율)의 양의 최대값은 마찬가지로 가덕도 주변 해역에서 각각 2.14 m, 1.45 m/yr, 0.46 m/yr로 나타났으며 신자도 동쪽 부분의 해안 부근 해역에서 -1.15 m, -0.23 m/yr, -0.21 m/yr로 음의 최대값이 나타났다. 또한 수로 주변에서 수로와 동일한 방향으로 나타나는 양측의 상반된 변화 양상은 이는 수로축의 변화에 따른 결과로 판단된다.

수로 주변의 등수심도 자료 결과에 의하면, 수로의 축이 북서쪽으로 회전함에 따라 월류가 발생하고 기존의 수로는 폐쇄되고 새로운 수로가 형성되었다. 동시에 퇴적물 우회 과정을 통하여 진우도 전면의 퇴적지가 확장되는 것으로 파악되었다. 그러나 이러한 수로의 거동이 반복성인지 일회성인지를 알기 위해서는 추가적인 자료가 필요하다.

EOF 분석으로 산출된 제 1 모드는 전체 변화의 48.7%를 차지하며 공간분포는 대체로 서쪽에서 높게 나타나고 시간계수는 지속적인 증가 경향을 나타낸다. 전체적으로 위치별 지형 변화 양상이 수치수심 분석 결과와 유사하게 나타나기 때문에 제 1 모드는 연구 지역내의 지형 변화를 반영하며 연안류에 의하여 서쪽으로 이동하는 퇴적물의 거동과 관련 있는 것으로 해석된다. 제 2 모드의 비중은 16.6%이며 공간분포는 대체로 신자도 전면에 해안선과 평행하게 좁고 길게 발달하였고 시간 계수는 약 4년의 주기성의 보였으나 전체적으로 미약한 감소 경향을 나타낸다. 제 2 모드는 낙동강에서 방류하는 토사 유출량과 높은 상관성(상관계수 0.73)을 보이기 때문에 낙동강에서 유출된 퇴적물이 일차적으로 신자도 전면에 퇴적되는 것으로 해석될 수 있었다. 제 3 모드(11.3%)의 공간분포는 신자도 동쪽 부분의 해안 부근 해역에서 유의하며 수치수심 분석 결과에서 나타난 이 지역의 침식에 상당 부분 기여한 것으로 판단된다. 이러한 지형 변화는 기존의 해안선 이동에 대한 연구 결과와 유사하며 신자도 해안선의 전진 및 후퇴 과정과 관련이 있음을 의미한다.

향후 진우도와 신자도 주변에서 발생할 지형 변화의 방

향성을 제시하였으며, 이 지역의 준설 및 해난사고 예방 대책 수립뿐만 아니라 연안 개발 및 보전에 대한 다양한 정책 결정에도 유용한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

사 사

이 논문에 사용된 자료의 발표를 허락한 한국해양과학기술원(KIOST)과 논문심사를 통해 좋은 지적을 해 주신 두 분의 심사위원들께도 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 김기철, 임흥덕, 김재중 (2008) 하계 낙동강 하구수와 외해수의 혼합에 관한 연구. 동아대학교 해양자원연구소 연구논문집 **20**:55-61
- 김백운, 김부근, 이상룡 (2007) 낙동강 하구역 울타리 섬의 해안선 변화율. 한국해양환경공학회지 **19**(4):361-374
- 김상호, 신승호, 양상용, 이중우 (2003) 낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구. 한국해양환경공학회지 **6**(3):26-36
- 김재중, 김기철, 이정만 (1995) 낙동강 하구에서의 부유사 거동에 관한 연구. 한국해양공학회지 **9**(1):120-131
- 류청로, 장선덕 (1979) 낙동강 하구의 조석과 유동. 한국해양학회지 **14**(2):71-77
- 부산지방해양항만청 (2010) 부산항 신항 해양수리현상 연구개발 용역(4차). 한국해양연구원, BSPM 555030-2190-1, 536 p
- 유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006) 해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화. 한국해양공학회지 **20**(6):54-60
- 윤은찬, 이종섭 (2008) 낙동강 하구역의 계절적인 퇴적환경 변화특성. 한국해양·해양공학회 논문집 **20**(4):372-389
- 윤한삼, 유창일, 류청로, 이인철 (2005) 낙동강 하구역 진우도 주변의 퇴적환경변화. In: 2005년도 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 서울대학교, 서울, 2005년 11월 17일-18일, pp 44-49
- 이인철, 유창일, 윤한삼 (2007) 낙동강 부정형적 사주발달과 환경인자간의 상관성 비교 연구. 한국해양환경공학회지 **10**(1):13-20
- 이인철, 임성필, 윤한삼, 김헌태 (2008) 낙동강 하구역 사주지형 변동과 부유사(SS) 수송량 산정. 한국해양환경공학회지 **11**(2):70-77
- 장성태, 김기철 (2006) 낙동강 하구에서의 해양 환경 변화. 한국해양학회지 「바다」 **11**(1):11-20
- Barletta RC, Franco D, Melo E, Pereira PS, Tozzi H, Calliari LJ (2004) Application of the empirical orthogonal functions for the analysis of southern Brazilian beach profiles. J Coastal Res **39**:351-354
- Bird E (2008) Coastal geomorphology: an introduction. John Wiley & Sons, Chichester, 322 p
- Bruun P, Gerritsen F (1959) Natural bypassing of sand at coastal inlets. J Waterway Div-ASCE **85**(1959):75-107
- Burgh LBVD, Wijnberg KM, Hulscher SJMH (2009) Dune morphology along a nourished coastline. J Coastal Res **56**:292-296
- Castelle B, Bourget J, Molnar N, Strauss D, Deschamps S, Tomlinson R (2007) Dynamics of a wave-dominated tidal inlet and influence on adjacent beaches, Currumbin Creek, Gold Coast, Australia. Coast Eng **54**(1):77-90
- Davies JL, Moses CA (1964) A morphogenic approach to world shorelines. Z Geomorphol **8**:127-142
- Davis RA, Hayes MO (1984) What is a wave-dominated coast? Mar Geol **60**(1):313-329
- Davis JR, FitzGerald D (2009) Beaches and coasts. Blackwell, Oxford, 419 p
- Dean RG, Dalrymple RA (2004) Coastal processes with engineering application. Cambridge University Press, Cambridge, 475 p
- FitzGerald DM (1982) Sediment bypassing at mixed energy tidal inlets. In: Proceedings of 18th Conference on Coastal Engineering, Cape Town, South Africa, 1982
- FitzGerald DM, Kraus NC, Hands EB (2000) Natural mechanisms of sediment bypassing at tidal inlets. ERDC/CHL CHETN **4**(30):1-10
- FitzGerald DM (2005) Tidal inlets. In: Schwartz ML (ed) Encyclopedia of coastal science. Springer, New York, pp 958-965
- Galloway WE (1975) Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: Broussard ML (ed) Deltas: Models for Exploration, Houston, Texas, 1975
- Hayes MO (1979) Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman SP (ed) Barrier Islands. Academic Press, New York, pp 1-27
- Kaihatu JM, Handler RA, Marmorino GO, Shay LK (1998) Empirical orthogonal function analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods. J Atmos Ocean Tech **15**(4):927-941
- KHOA (2012) Final results table of mean sea level. Korea Hydrographic and Oceanographic Administration. <http://www.khoa.go.kr/> Accessed 20 July 2012
- Kim H, Park GY (2003) Prediction of change in tidal system and deltas at Nakdong estuary due to construction of Busan new port. In: Brebbia CA, Almorza D, Lopez-Aquayo F (eds) Coastal Engineering VI : Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions,

- Wit Press, Southampton, pp 91-100
- KMA (2012) The Geojedo buoy data. Korea Meteorological Administration. <http://www.kma.go.kr/> Accessed 20 July 2012
- Kraus NC, Militello A, Todoroff G (2002) Barrier breaching processes and barrier spit breach, Stone Lagoon, California. *Shore & Beach* **70**(4):21-28
- Kutzbach JE (1967) Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America. *J Appl Meteorol* **6**(5):791-802
- K-water (2012) Information about quality of water at a multipurpose dam. <http://www.kwater.or.kr> Accessed 20 July 2012
- Lee HJ, Wang YP, Chu YS, Jo HR (2006) Suspended sediment transport in the coastal area of Jinhae Bay – Nakdong Estuary, Korea Strait. *J Coastal Res* **22**(5): 1062-1069
- Lorenz EN (1956) Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Cambridge, Massachusetts, 48 p
- Miles JR, Russell PE, Huntley DA (2000) Surf zone hydrodynamics at Teignmouth main experiment, COAST3D. Overall Workshop, June 2000, Caen
- Oertel GF (1988) Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands. In: David GA, Lee W (eds) *Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*. Springer, New York, pp 297-318
- Pruszek Z (1993) The analysis of beach profile changes using Dean's method and empirical orthogonal functions. *Coast Eng* **19**(3):245-261
- Small C (1994) A global analysis of mid-ocean ridge axial topography. *Geophys J Int* **116**(1):64-84
- Stutz ML, Pilkey OH (2001) A review of global barrier island distribution. In: *Proceedings of 6th international coastal symposium, Rotorua, New Zealand, 24-28 April 2000*
- Stutz ML, Pilkey OH (2002) Global distribution and morphology of deltaic barrier island systems. In: *Proceedings of 6th international coastal symposium, Templepatrick, North Ireland, 25-29 March 2002*
- Thieler E, Himmelstoss EA, Zichichi JL, Ergul A (2009) The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0- an ArcGIS extension for calculating shoreline change. USGS, Massachusetts, U.S. Geological Survey open-file report 2008, p 1278
- Tsuchiya Y, Shirai T, Ashita T (1982) Long-term changes in beach profiles at Ogata coast. *Bull Disaster Prevention Res Ins* **32**(3):171-187
- Van Lancker V, Lanckneus J, Hearn S, Hoekstra P, Levoy F, Miles J, Moerkerke G, Monfort O, Whitehouse R (2004) Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). *Cont Shelf Res* **24**(11):1171-1202
- Winant CD, Inman DL, Nordstrom CE (1975) Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *J Geophys Res* **80**(15):1979-1986
- 국문 참고자료의 영어 표기**
English translation / Romanization of references originally written in Korean
- Busan Regional Maritime Affairs & Post Office (2010) Estimation of Hydraulic States in Busan New Port (4th). Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, KIOST Technical Paper 536 (in Korean)
- Chang S-T, Kim K-C (2006) Change of Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary. *J Korean Soc Oceanogr* **11**(1):11-20 (in Korean)
- Kim B-O, Kim B-K, Lee S-R (2007) Rate of Shoreline Changes for Barrier Islands in Nakdong Estuary. *J Korean Soc Coastal Ocean Eng* **19**(4):361-374 (in Korean)
- Kim J-J, Kim K-C, Lee J-M (1995) A study on the suspended sediment transport in the Nakdong Estuary. *J Korean Soc Coastal Ocean Eng* **9**(1):120-131 (in Korean)
- Kim K-C, Yim H-D, Kim J-J (2008) A study on the mixing of Nakdong Estuarine Water with Sea Water in Summer. *Bull Ocean Resources Res Inst Dong-A Univ* **20**:55-61 (in Korean)
- Kim S-H, Shin S-H, Yang S-Y, Lee J-W (2003) A study on delta processes at the Estuary of Nak-Dong River. *J Korean Soc Marine Environ Eng* **6**(3):26-36 (in Korean)
- Lee I-C, Yoo C-I, Yoon H-S (2007) Correlation between sandbar development and environmental factors in the Nakdong River Estuary. *J Korean Soc Marine Environ Eng* **10**(1):13-20 (in Korean)
- Lee I-C, Lim S-P, Yoon H-S, Kim H-T (2008) Topographical change monitoring of the sandbar and estimation of suspended solid flux in the Nakdong River Estuary. *J Korean Soc Marine Environ Eng* **11**(2):70-77 (in Korean)
- Ryu C-R, Chang S-D (1979) Tide and tidal current in the Estuary of the Nakdong River. *J Ocean Soc Korea* **14**(2):71-77 (in Korean)
- Yoo C-I, Yoon H-S, Ryu C-R, Lee I-C (2006) Spatio-temporal changes of the sand barrier using marine charts analysis in the Nakdong River Estuarine. *J Korean Soc Coastal Ocean Eng* **20**(6):54-60 (in Korean)
- Yoon E-C, Lee J-S (2008) Characteristics of seasonal variation to sedimentary environment at the Estuary area of the Nakdong. *J Korean Soc Coastal Ocean Eng*

20(4):372-389 (in Korean)

Yoon H-S, Yoo C-I, Ryu C-R, LEE I-C (2005) Sediment
Environmental Change around Jinudo in Nakdong River
Estuary. In: Proceedings of the Korean Society for Marine
Environmental Engineering Autumn Meeting, Seoul Nat

Univ, Korea, 17-18 Nov 2005 (in Korean)

Received Feb. 3, 2014

Revised Apr. 14, 2014

Accepted Apr. 30, 2014