Article

항공사진과 SPOT-5 위성영상을 이용한 낙동강 하구역 울타리섬들의 해안선 변화율

정상훈^{1,2} · 김부근^{1*} · 김백운³ · 이상룡¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부 해양학과
(609-735) 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

²한국해양과학기술원 연안재해재난연구센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³군산대학교 새만금환경연구센터
(573-701) 전라북도 군산시 대학로 558

Shoreline-change Rates of the Barrier Islands in Nakdong River Estuary Using Aerial Photography and SPOT-5 Image

Sang-Hun Jeong^{1,2}, Boo-Keun Khim^{1*}, Beack-Oon Kim³, and Sang-Ryong Lee¹

¹*Department of Oceanography, Division of Earth Environmental System, Pusan National University
Busan 609-735, Korea*

²*Coastal Disaster Research Center, KIOST
Ansan 426-744, Korea*

³*Saemangeum Environmental Research Center, Kunsan National University
Gunsan 573-701, Korea*

Abstract : Shoreline data of the barrier islands in Nakdong River Estuary for the last three decades were assembled using six sets of aerial photographs and seven sets of satellite images. Canny Algorithm was applied to untreated data in order to obtain a wet-dry boundary as a proxy shoreline. Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.0) was used to estimate the rate of shoreline changes in terms of five statistical variables; SCE (Shoreline Change Envelope), NSM (Net Shoreline Movement), EPR(End Point Rate), LRR (Linear Regression Rate), and LMS (Least Median of Squares). The shoreline in Jinwoodo varied differently from one place to another during the last three decades; the west tail has advanced (i.e., seaward or southward), the west part has regressed, the south part has advanced, and the east part has regressed. After the 2000s, the rate of shoreline changes (−2.5~6.7 m/yr) increased and the east advanced. The shoreline in Shinjado shows a counterclockwise movement; the west part has advanced, but the east part has retreated. Since Shinjado was built in its present form, the west part became stable, but the east part has regressed faster. The rate of shoreline changes (−16.0~12.0 m/yr) in Shinjado is greater than that of Jinwoodo. The shoreline in Doyodeung has advanced at a rate of 31.5 m/yr. Since Doyodeung was built in its present form, the south part has regressed at the rate of −18.2 m/yr, but the east and west parts have advanced at the rate of 13.5~14.3 m/yr. Based on Digital Shoreline Analysis, shoreline changes in the barrier islands in the Nakdong River Estuary have varied both temporally and spatially, although the exact reason for the shoreline changes requires more investigation.

Key words : shoreline change, aerial photograph, satellite image, Nakdong River estuary, barrier islands

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

1. 서 론

하구의 전면에 형성되는 울타리섬(barrier island)은 조석과 파랑작용 및 하천 유출에 의해 영향을 받는 퇴적지형이다. 이러한 울타리섬은 외해에서 진입하는 파랑 에너지를 흡수하고 폭풍과 해일로 발생할 수 있는 해안의 피해를 감소시키는 자연방벽의 역할을 수행한다. 울타리섬의 배후지역은 육상 환경과 해양 환경의 접이지대로서, 두 환경의 물질교환의 장을 형성하며 다양한 동식물의 서식처를 제공한다(Carter 1988). 울타리섬의 기능은 기후온난화와 함께 대두되는 해수면 상승, 연안지역에 발생하는 침수, 폭풍, 해일 등의 자연재해가 증가할 것이라는 우려와 함께 인간활동지역을 보호하는 역할로 주목받고 있다. 생물종의 보호와 이에 따른 서식지 보전과 같은 생태학적 가치가 커지고 있는 상황에서, 국내에서는 전체 하구 시스템을 관리하는 차원에서 울타리섬은 하나의 자원으로 관리되는 실정이다.

낙동강 하구역은 국내의 대표적인 삼각주 지형으로 삼각주 전면을 구성하는 울타리섬(진우도, 신자도, 도요등)과 그 배후의 간석지로 이루어져 있다(Fig. 1). 낙동강 하구역의 풍부한 수산자원과 하천 자체의 수자원에 의해, 이 지역에서의 인간 활동 범위는 점점 확대되고 해안 공간 이용도가 꾸준히 증가하였다. 이러한 이유로, 1980년대에 낙동강 하구둑과 신평·장림 산업단지 조성, 1990년대에 녹산·신호 공단 조성, 그리고 2000년대에는 명지지구, 신

항만 건설 등 해안지형은 끊임없는 인위적인 변화를 겪어왔다.

낙동강 하구의 인공적인 환경변화가 울타리섬의 지형 변동 및 퇴적환경에도 영향을 미칠 것이라는 의견이 여러 연구자들에 의해 제기되었다(예, 오 1988, 1999). 하구둑 준공은 유량 및 유로 변화와 함께 낙동강 상류로부터의 퇴적물 운반과 하구로의 유출에 변화를 초래하여 낙동강 하구 일대의 퇴적환경에 영향을 미치게 된다(오 1988). 낙동강 하구둑이 건설되기 이전까지 장자도의 남쪽에는 새등이 형성되었고 을숙도의 남쪽에는 백합등과 나무섬등이 형성되었으나 1987년 하구둑 공사의 완공 후 백합등과 나무섬등의 남쪽으로 도요등과 같은 새로운 퇴적체가 형성되고 합체되어 나타나고 있다(부산광역시 2008). 이것은 하구둑의 건설 이후 삼각주 말단이 빠르게 전진하며 발달하고 있다는 것을 의미한다(오 1999).

해빈과 울타리섬 등 연안지형의 변화를 조사하기 위해서는 장기간의 해안선 변화 자료를 구축하는 것이 가장 효과적인 방법이다(Baily and Nowell 1996; Moore 2000; Morton et al. 2004). 해안선 변화는 기후, 퇴적환경, 해수면 등의 여러 가지 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 장기간의 해안선 변화를 조사하는 것은 향후 발생가능한 지형 변동의 방향을 예측하는 중요한 근거자료가 된다. 해안선을 포함한 연안의 지형변동을 살펴보기 위하여 다양한 측량 기법 및 원격탐사기법이 사용되고 있다. 항공사진, 인공위성 영상 등의 원격탐사자료를 사용하여 해안지형을

Fig. 1. Barrier islands(Jinwoodo, Shinjado, Doyodeung, etc.) in Nakdong River Estuary in 2009 from SPOT-5 imagery. One grid means 200 m

획득하는 방법은 직접적인 측량자료에 비해 정확도는 떨어지지만 광역의 자료를 손쉽게 획득할 수 있는 장점이 있다. 1999년 IKONOS 위성에 대한 서비스를 시작한 이후로 Quickbird, SPOT-5, Formosat-2 등 고해상도 위성영상이 제공되고 있으며 2008년부터 가동된 GeoEye-1의 경우 0.41 m/pixel의 해상도를 가지는 위성영상을 제공하고 있다. 최근 국내에서는 낙동강 하구역에 위치한 울타리섬의 해안선변화를 해석하기 위하여 지형도, 해도, 항공사진, 위성영상 등의 원격탐사자료를 이용한 연구가 진행되었다(김 2005; 유 등 2006; 김 등 2007; 오 등 2010).

김 (2005)은 낙동강 하구역의 1987년, 1996년, 2001년 항공사진을 토대로 해안선을 추출한 후 울타리섬의 면적 및 도심 변화를 분석하였다. 유 등 (2006)은 1972년~1995년에 발간된 총 6개의 수치해도를 바탕으로 낙동강 하구역 사주간의 거리 및 수심 분석, 각 연도별 조간대와 사주의 면적을 산출하였다. 김 등 (2007)은 GIS에 근거한 수치해안선 분석시스템을 이용하여 1975년부터 2001년까지 6차례에 걸쳐 촬영된 항공사진으로부터 낙동강 하구역의 울타리섬 해안선의 변화율을 분석하였다. 오 등 (2010)은 낙동강 하구역에 대한 1975년~2009년까지 총 12매의 Landsat 위성영상을 사용하여 GIS를 이용한 해안선 변화율을 계산하였다. 서로 다른 자료들로부터 도출된 유 등 (2006), 김 등 (2007), 오 등 (2010)의 해안선 이동방향은 서로 상이한 결과를 나타내는 부분이 존재한다. 유 등 (2006)의 경우 해안선 획득을 위해 해도를 사용하였는데 지형도나 해도는 상당기간 편집과정을 거치므로 해안선 작성시기가 모호한 경우가 있다. 그리고 해안선 이동방향을 산정하는 과정에서 3개의 축선만을 고려해서 모든 울타리섬들은 바다 쪽으로 전진한다고 보고하였다. 김 등 (2007)과 오 등 (2010)의 연구결과에서 진우도와 신자도의 이동 방향 및 크기는 대체로 비슷하지만 도요동의 경우 김 등 (2007)은 꾸준히 전진한다고 보고한 반면에, 오 등 (2010)은 점차 후퇴한다고 보고하였다. 연구자들 사이에서 서로 상반된 이동방향을 제시하고 있기 때문에 연구과정에 대한 검토 및 결과에 대한 고찰이 필요하다.

낙동강 하구역 울타리섬들의 지형변동에 의해서 소형어선의 안전 통행로 폐색 및 협소화와 이로 인한 해난사고 발생, 항로 유지를 위한 준설, 양식어장의 재배치, 하천에서 유입되는 각종 쓰레기가 퇴적되는 등 여러 가지 사회 문제들이 발생하였다. 낙동강 하구역 울타리섬들의 지형변동은 해안지역 전체의 다양한 환경문제로 확대되며 울타리섬이 가진 다양한 기능과 가치에 직접적인 영향을 주기 때문에, 인간 활동 및 자연 환경의 보호를 위하여 울타리섬의 지형변동에 대한 장기적인 관측과 예측의 필요성이 제기된다. 이 연구에서는 국토지리정보원에서 제공하는 항공사진 및 SPOT-5 인공위성 영상을 사용하여 낙동

강 하구역에 위치한 진우도, 신자도, 도요동의 해안선을 추출하고, 해안선 변화율 및 시간에 따른 해안선 변화율의 경향을 수치해안선 분석 시스템(DSAS 4.0 : Digital Shoreline Analysis System 4.0, Thieler et al. 2009)과 통계기법으로 정량화하여 낙동강 하구역 울타리섬들의 장기적인 이동경향을 파악하였다.

2. 연구 방법

항공사진 및 인공위성영상

이 연구에서는 국토지리정보원에서 1975년부터 2001년까지 낙동강 하구역 육상 연안 및 울타리섬에 대하여 총 6회('75, '82, '87, '93, '96, '01) 촬영된 1:20,000 항공사진을 사용하였다. 축척 1:20,000의 항공사진은 지상영역 약 4×4 km 범위를 표현한다. 연구대상인 진우도, 신자도, 도요동의 해안선을 제작하기 위해서 여러 경로로 촬영된 항공사진들을 접합하여 하나의 이미지로 제작할 필요가 있다. 이 연구에서는 김 등 (2005)이 제작한 낙동강 하구역의 모자이크 항공사진을 사용하였다. 항공사진은 600 dpi의 해상도를 가지는 고속스캐너를 이용하여 수치영상으로 변환되었다. 항공사진의 기하보정 및 접합에 사용된 육상 기준점은 국토지리정보원에서 발행한 1:5,000 수치육도 20장에서 추출되었다(김 등 2005). 모자이크 항공사진은 후처리를 수행하는 과정에서 컴퓨터의 저장공간, 영상처리시간을 고려하여 3 m/pixel의 해상도로 제작되었다. 항공사진 고유의 해상도는 3 m/pixel 보다 우수하며 만약 영상 저장 능력이 충분하고 처리시간을 단축시킬 수 있는 장비가 있다면 필름의 고유 해상도 수준의 자료를 획득할 수 있다. 연구에 사용된 수치영상의 GSD(Ground Sample Distance)는 0.8 m이며 2400 dpi의 해상도를 가지는 스캐너를 사용한다면 GSD는 0.2 m가 된다. 각 픽셀은 UTM 좌표계에 준하여 실제 지형좌표로 사용된다(Table 1).

SPOT-5 위성은 고해상도 광학센서를 사용하여 지상 이미지를 획득하기 위해 개발되었고 새로운 촬영센서는 최대 5 m/pixel의 해상도를 가지는 단일 밴드 영상을 제공한다. 그러나 실제 영상을 사용자에게 제공하는 과정에서 단일 밴드 영상 2매를 기하학적으로 접합하여 실제 해상도가 2.5 m/pixel인 영상으로 변환하고 여기에 10 m/pixel의 컬러밴드 영상을 사용하여 최종적으로 2.5 m/pixel의 해상도를 가지는 컬러영상을 제공한다. 이 연구에서는 2002년부터 2009년까지 총 6매('02, '03, '04, '06, '08, '09)의 위성영상을 사용하였다. 영상은 연중 기상상태가 가장 양호한 시기를 선정하여 연 1회 획득하였으며 가급적 매년 촬영 시기가 비슷하도록 고려하여 대체로 11월과 12월에 관측된 영상을 수집하였다(Table 1). 좌표 보정에는 국토지리정보원에서 발행하는 1:50,000 수치해도(No. 202)에서 추

Table 1. Data information used in this study

Year	Type	Time	Tide (cm)	Resolution (m/pixel)
1975	aerial photo	?/ ?, ?	?	3.0
1982	aerial photo	05/ ?, ?	?	3.0
1987	aerial photo	10/ ?, ?	?	3.0
1993	aerial photo	08/ ?, ?	?	3.0
1996	aerial photo	11/27, 12:54	99	3.0
2001	aerial photo	12/02, 10:14	179	3.0
2002	satellite	12/27, 11:23	101	2.5
2003	satellite	10/03, 10:38	118	2.5
2004	satellite	11/12, 11:30	97	2.5
2006	satellite	11/20, 11:30	96	2.5
2008	satellite	12/19, 11:09	116	2.5
2009	satellite	12/02, 11:25	117	2.5

출한 육상기준점(Ground Control Point; GCP)을 사용하였다. 처리된 영상은 앞서 언급한 모자이크 항공사진과 같은 크기로 편집하였다.

해안선 추출

해안선의 인식 및 추출방법은 장기간의 해안선 변화 연구에서 가장 큰 오차발생 요인이 될 수 있다(Crowell et al. 1991). 낙동강 하구 울타리섬의 경우 배후 조간대는 경사가 완만하고 식생이 발달하여 그 경계가 모호하기 때문에 수륙경계선 인식에 오차를 발생시킬 수 있다. 울타리섬의 전면 조간대는 모래 해변과 수역의 구분이 비교적 명확하고 외부로부터 유입되는 조류와 파랑에 직접적으로 맞닿아있어 해안선 변동을 대변하기에 적합하다고 생각된다. 따라서 이 연구에서는 연구대상을 울타리섬의 전면 조간대로 한정하였다.

일반적으로 항공사진에서 가장 인식하기 쉬운 해안선은 고조선으로 알려져 있다(Crowell et al. 1991). 그러나 낙동강 하구역 울타리섬의 해변은 고도차가 적기 때문에 고조선의 구분이 명확하지 않아서 수륙경계선이 사용된다. 수륙경계선은 그 지역의 조차와 해변의 경사에 민감하게 반응할 수 있기 때문에 사진 촬영 당시의 조위 정보가 요구된다. 영상의 조위자료는 촬영시각을 기준으로 하여 국립해양조사원에서 제공하는 가덕도 조위관측소의 1시간 간격 조석자료를 내삽하여 획득하였다. 2008년 측량에 따르면 가덕도 조위관측소의 평균해면은 수심기준면(datum level)으로부터 95.3 cm, 약최고고조면은 178.3 cm이다. 각 영상의 조위정보는 Table 1에 제시되어 있다. 이 연구에 사용된 항공사진 및 위성영상의 경우, 최근의 자료에는 촬영시각이 비교적 명확히 제시되어 있으나 1996년 이전의 초기 항공사진의 경우 정확한 촬영시기에 대한 기록이 누락되어 있다. 촬영시각이 기록된 자료의 경우 대체로 평균

해면 위 +1~20 cm 조위에서 촬영된 것이며 2001년의 경우는 해수면 고도가 약최고고조면인 시기에 촬영되었다.

조위에 따른 오차범위를 산정하기 위해서는 해변의 경사도를 고려해야 한다. 2008년 3월 RTK-DGPS를 이용하여 관측된 울타리섬의 평균해면과 약최고고조면에 대한 등고선을 이용하여 해안 경사를 산출하였다(부산광역시 2008). 진우도의 경우 평균해면과 약최고고조면 사이의 평균거리는 62.3 m 표준편차는 43.4 m, 조위 1 cm당 해안선 이동거리는 0.8 m이다. 신자도의 경우 평균거리 17.2 m, 표준편차 7.0 m, 조위 1 cm당 해안선 이동거리 0.2 m, 도요도의 경우 평균거리 39.2 m, 표준편차 43.1 m, 1 cm당 해안선 이동거리 0.5 m로 나타난다. 측량결과의 표준편차로 보아 신자도의 경우 해안선의 경사가 비교적 일정한 것으로 보이지만 진우도와 도요도의 경우는 해안선 경사가 복잡하게 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 조위 보정을 위해 일정한 값을 가감하는 것은 지역별로 더 큰 오차를 발생시킬 가능성이 있다. 촬영시각이 기록된 자료의 경우 2001년을 제외하면 대부분 평균해면과 비슷한 조위에 촬영되어, 해안선 변화율을 계산하는 과정에서 조위에 따른 보정은 하지 않았다.

낙동강 하구역 울타리섬의 수륙경계선은 모래해빈과 수역의 경계선으로 인식할 수 있다. 이러한 경우 영상처리 기법 중 경계선을 검출하는 방법(edge detection)이 유용하게 사용될 수 있다. “가장자리”(edge)란 영상 내부에 존재하는 객체들의 경계선을 말하며 각 픽셀간의 명암 차이로 구분할 수 있으며 명암도 차이를 토대로 “경사도”(gradient)를 만들고 이를 미분하여 가장자리를 획득하게 된다.

Canny Edge Detector는 다양한 가장자리 검출방법 중에서 가장 정확하게 정의된 연산자로 폭넓게 이용되고 있다(Canny 1986). 항공사진과 위성영상에서 Canny algorithm

을 적용하는 방법으로 MATLAB을 이용하였다. MATLAB의 내장함수인 'edge'를 이용하면 다양한 검출방법 중 Canny detector를 선택할 수 있다. 영상을 평활화시키는 정도를 결정하는 가우시안 필터의 표준편차는 1.1, 상향·하향 임계치는 각각 0.030과 0.065로 설정하였다. 이 연구에서는 흑백 항공사진과 컬러 위성영상을 혼용하여 사용하였다. 따라서 경계선 검출과정에는 같은 기준을 적용할 필요가 있기 때문에 위성영상의 명암만을 추출하기 위하여 RGB로 구성된 영상을 YCbCr 형식으로 변환하였고 여기서 밝기 성분인 Y(luminance)를 이용하여 경계선을 검출하였다. Landsat 위성영상과 같이 적외선 밴드를 사용하는 방법과는 달리 영상의 음영을 사용하여 수역과 육역을 구분하는 방법은 조위와 파랑에 의해 어렵게 나타난 해안을 수역으로 구분할 수 있다. 이 연구에서 사용된 경계선 검출방법은 수역과 육역을 비교적 명확히 구분하고 있으며 오차범위는 1 pixel 이하이다.

GIS 수치 해안선 분석 시스템

해안선 변화율을 산정하기 위해 USGS(U.S. Geological Survey)에서 제공하는 수치해안선 분석 시스템(DSAS 4.0 : Digital Shoreline Analysis System 4.0, Thieler et al. 2009)을 사용하였다. DSAS는 ESRI의 ArcGIS 프로그램 내부에서 구동되는 도구이며 여러 개의 해안선 위치로부터 변화율에 대한 통계자료를 산출하는 프로그램이다.

DSAS는 ArcGIS 기반의 확장도구이기 때문에 수치자료로 제작된 해안선을 GIS에서 사용가능한 공간정보로 변환하는 과정이 선행된다. 이러한 과정에서 각 해안선의

촬영시간에 대한 정보가 요구되며 이는 시간에 따른 해안선 변화를 계산할 때 사용된다. DSAS에서는 해안의 이동특성을 정의하는 기준으로 기준선(baseline)과 측정선(transect)을 사용하며 해안선 변화율은 측정선과 해안선이 만나는 교점들의 거리 및 해안선의 시간정보에 의해 계산된다. 여기에서 거리는 교점과 기준선 사이의 이격거리를 의미한다. 기준선과 측정선의 형태에 따라 해안선 변화율 및 침식과 퇴적의 정도가 변할 수 있기 때문에 이들 측정선들은 연구지역의 특성과 연구목적에 고려하여 설정되어야 한다. 진우도의 경우 울타리섬 전면 해빈의 이동경향을 살펴보기 위하여 기준선을 위해 방향에 두었으며 울타리섬과 평행하게 배치하되 해안선들의 곡률을 고려하여 제작되었다. 기준선을 울타리섬의 서측 꼬리부분까지 확장하여 울타리섬의 확장정도를 고려할 수 있도록 하였다. 동측 꼬리의 경우 전체 기간에 걸쳐 해안선이 일정한 위치에 있는 것으로 보여 기준선을 확장하지 않았다. 신자도 역시 기준선을 울타리섬에 평행하게 배치하되 해안선의 곡률을 고려하여 제작하였으며 서측 꼬리부분의 변동양상을 확인하기 위하여 측선을 추가로 배치하였다. 도요도의 경우 백합등에서 확장된 형태로 성장했기 때문에 백합등의 해안선을 포함할 수 있도록 측정선을 백합등 전면까지 확장하였다. 해안선 변화율은 각 측정선을 기준으로 계산된다. 측정선의 길이는 전체 해안선을 포함할 수 있도록 조정하였으며 100 m 간격으로 설정되었다. Fig. 2는 이 연구에서 사용한 각 울타리섬에 설정된 기준선과 측정선을 보여준다.

이 연구에서는 DSAS 프로그램에서 제공하는 5개의 통

Fig. 2. Baselines and transects for each barrier island (Jinwoodo, Shinjado and Doyodeung), used in DSAS 4.0. The axis unit is UTM zone 52N. Gray line is extracted digital nautical chart produced in 2004. Horizontal and vertical gradations represent 1 km in scale

계값(SCE, NSM, EPR, LRR, WLR, LMS)을 계산하였다. SCE(Shoreline Change Envelope)은 기준선으로부터 가장 멀리 떨어진 해안선과 가장 가까운 해안선 사이의 거리를 지시한다. SCE는 시간과는 무관하게 관측점을 기준으로 총 이동거리만을 절대값으로 계산하며 항상 양의 값을 가진다. NSM(Net Shoreline Movement)은 가장 오래된 해안선과 가장 최근의 해안선 사이의 이격거리를 나타낸다. 이 연구에서는 최초시점인 1975년 해안선과 2009년 해안선과의 거리에 해당한다. 이격거리는 기준선을 중심으로 계산하며 최초의 해안선에서 최근의 해안선까지의 거리를 산정하기 때문에 양의 값은 기준선 방향이 외해 방향으로의 이동을 의미하며 음의 값은 그 반대를 의미한다. EPR(End Point Rate)은 가장 오래된 해안선과 가장 최근의 해안선과의 이격거리(NSM)를 경과된 시간으로 나눈 것이다. 이 방법은 계산이 간편하고 요구되는 자료량이 적다는 이점이 있다. 그러나 단지 두 개의 자료만을 사용하기 때문에 전체 자료가 포함되지 못하고 이로 인하여 관측기간 동안의 변화, 예를 들어 전진과 후퇴 양상 또는 주기적인 변화 등이 무시되는 단점이 있다(Dolan et al. 1991). LRR(Linear Regression Rate)은 각 측선의 시간에 따른 기준선과 해안선들의 거리에 대해서 최소자승법을 적용하여 추세선을 계산하며, 추세선의 기울기를 해안선 변화율로 간주한다. 여기서 양의 기울기는 기준선 방향, 즉 외해 방향으로의 전진을 의미한다. LMS(Least Median of Squares)는 LRR과 같이 시간에 따른 기준선과 해안선들의 거리에 대해 추세선을 계산하는 또 다른 방법이다. 최적화된 직선을 산정할 때 LRR은 분산의 합이 최소가 되는 직선을 산정하지만 LMS는 분산의 중간값이 최소가 되는 직선을 사용한다(Rousseeuw 1984). 따라서 이 방법은 LRR보다 비정상적인 특이점들의 영향을 덜 받는다는 장점이 있으나 중간값의 특성에 의해 자료가 편향되어 있으면 왜곡된 결과가 산출될 수 있다.

해안선 변화율의 경향

이 연구의 관측기간동안 낙동강 하구역에서는 하구둑의 건설과 공단 건설을 위한 대규모 매립, 그리고 부산 신항 건설 등의 인위적인 지형변화가 진행되어 왔다. 이러한 사건들이 하구의 퇴적환경에 영향을 주었다고 가정하면 시간에 따른 울타리섬의 해안선 변화율도 점차 가속 혹은 감속되거나 일정하게 유지될 것으로 생각된다. 시간에 따른 지형변동의 규모를 산정하는 것은 환경 변화와 하구의 지형변동과의 관계를 규명하기 위한 기초자료가 될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 변동양상을 살펴보기 위해 시간 순서대로 해안선을 두 개씩 선정하여('75-'82, '82-'87, '87-'93, ...) 전체 측선에 대한 EPR의 평균(mean EPR)을 계산하였다. 이렇게 각 시기별로 산출된 mean EPR에 대하여

선형회귀분석법을 사용하여 각 시간간격에 대한 mean EPR의 기울기를 도출하였다. 여기서 계산된 직선의 기울기는 mean EPR의 변동속도로 생각할 수 있다. 양의 기울기는 해안선 변화율이 기준선 방향(즉 외해방향)으로 점차 증가하는 것을 의미하며 음의 기울기는 해안선 변화율이 육지방향으로 점차 증가하는 것을 의미한다. 기울기의 크기가 0에 가까울수록 해안선 변화율이 일정한 것으로 판단할 수 있다.

위의 계산법은 각 시기별 EPR을 계산하기 때문에 시간 간격이 서로 다른 경우 오차의 범위도 달리 고려되어야 한다. 예를 들어 1975년~1982년 자료의 묶음은 7년의 시간간격이 존재하지만 2008년~2009년 자료의 묶음은 단지 1년의 시간간격으로 구성되기 때문에 태풍과 같은 기상현상에 의한 변동 또는 조위에 의한 오차가 더욱 크게 발생할 수 있다. 따라서 각 측선들에 대한 mean EPR은 분산과 함께 고려되어야 한다. 이 연구에서는 mean EPR과 그에 대한 분산 정도를 상자-수염모형(box-and-whisker diagram)으로 제시하였다. 상자-수염모형은 제1사분위수(Q1), 제2사분위수(Q2, 중위수), 제3사분위수(Q3)를 나타내는 상자, 자료의 최대값과 최소값을 나타내는 수염과 이상치를 함께 표출한다.

3. 결 과

진우도

진우도의 해안선 이동거리(SCE, NSM) 및 해안선 변화율(EPR, LRR, LMS)은 Fig. 3과 Fig. 4a에 각각 제시되어 있다. 여기서 X축은 진우도 전면 조간대에 설정한 측선 번호와 같다(Fig. 5). 진우도의 SCE와 NSM의 절대적인 크기는 측선 18번~26번 구간을 제외하고 비슷하다(Fig. 3). 이 구간에서는 SCE가 NSM에 비해 두 배 이상 크게 나타나는데 이는 해안선이 전진·후퇴한 범위가 동·서측에 비해 상대적으로 크게 변화된 것으로 판단할 수 있다. NSM의 양의 최대값은 2번 측선에서 관측된 114 m이며 음의 최대값은 29번 측선에서 관측된 -172 m이다.

EPR과 LRR은 전체 측선에서 서로 유사한 형태를 나타내며 -5.1~4.3 m/yr의 범위를 보인다(Fig. 4a). 해안선이 전진, 후퇴하는 양상은 진우도의 각 지역에서 다르게 나타나며 EPR과 LRR의 형태에 따라 4개의 구획으로 나누어 볼 수 있다. 서쪽 꼬리(측선 1번~4번)에서는 해안선이 기준선 방향으로 전진하고 있으며 서쪽부분(측선 5번~11번)은 후진, 남쪽부분(측선 12번~25번)은 전진, 동쪽부분(측선 26번~32번)은 후진하고 있다. Fig. 4a에는 LRR과 함께 제공되는 시간에 대한 해안선 이동거리의 상관관계수가 제시되어 있다. R^2 의 크기가 LRR의 값이 0에 가까울수록 감소하는 이유는 해안선 변화가 작을수록 단기간의 해안

Fig. 3. Rate of shoreline changes of NSM (Net Shoreline Movement), SCE (Shoreline Change Envelope) and its difference for each transect of Jinwoodo, Shinjado and Doyodeung. NSM is the distance between the oldest and youngest shorelines. SCE is the distance between the shorelines farthest and closest to the baseline. Difference is the gap between SCE and absolute NSM

Fig. 4. Rate of shoreline changes of EPR(End Point Rate), LRR(Linear Regression Rate) and LMS(Least Median of squares) for each transect of Jinwoodo, Shinjado and Doyodeung. EPR is calculated by dividing the distance of shoreline movement by the time elapsed between the oldest and the most recent shoreline. LRR is determined by fitting a least-squares regression line to all shorelines. LMS is determined by fitting a least-median-squares regression line to all shorelines. Fig. 4a includes shoreline data from 1975 to 2009, whereas Fig. 4b includes shoreline data from 1996 to 2009. Doyodeung covers the data from 2002 to 2009

Fig. 5. LRR variation for each section in Jinwoodo. A series of coastlines was extracted from aerial photographs and SPOT-5 imagery. Red arrow indicates that coastline is progressed, whereas blue arrow indicates that coastline is regressed. LRR was calculated in different temporal data (from 1975 to 2009 and from 1996 to 2009, respectively), both of which show either the different values or the different direction locally in Jinwoodo

선 변동 또는 해안선 위치에 대한 불확실성 등으로 인한 오차가 크게 작용하여 상관계수가 낮게 나타나는 것으로 보인다(김 등 2007).

LMS는 진우도의 남쪽부분과 동쪽부분에서 EPR과 LRR보다 크게 계산된다(Fig. 4a). 이러한 차이는 편차의 중간값이 최소가 되는 직선을 찾는 과정에서 해안선이 후퇴했던 시기의 자료가 반영되지 않은 결과이다. 실제로 진우도 남쪽 및 동쪽의 경우 1993년까지는 후퇴하다가 1996년 이후로 전진하는 양상을 보이므로 1996년 이전을 제외한 해안선 자료를 분석하였다. 1996년 이후의 해안선에 대한 EPR, LRR, LMS는 Fig. 4b에 제시되어 있다. 여기서 조위차가 크게 나타나는 2001년 자료는 제외하였다. 진우도 남측의 전진속도는 두 배 이상 크게 나타나며 동측은 1996년 이후로 오히려 전진하고 있는 것으로 나타난다. 서쪽 꼬리 및 서·남·동쪽 부분의 LRR을 평균한 값은 Fig. 5에 제시되어 있다. 1996년 이후의 LRR 평균은 전체기간의 LRR보다 크게 나타난다.

진우도의 시간에 따른 해안선 변화율의 경향은 Fig. 6에 제시되어 있으며 Fig. 5에 제시된 구간에 포함된 측선들의 mean EPR을 각각 제시하였다. 여기서 청색 실선은 전체 자료에 대한 추세선이며 적색 실선은 2001년을 제외한 1996년 이후 자료만으로 계산된 추세선이다. 선형회귀 분석에 의한 추세선의 기울기는 Table 2에 정리되어 있다. 진우도는 1987년 이후 전체적으로 해안선이 전진하는 양상이 나타난다. 진우도의 해안선 변화율은 연간 $0.1\sim0.6\text{ m/yr}^2$ 의 크기로 점차 빨라지는 것으로 보인다. 진우도 서쪽 꼬리의 경우 해안선의 전진속도가 점차 빨라지는 경향

이 있으며 1996년 이후로는 이러한 경향이 더욱 두드러진다. 서쪽 해안선은 후퇴하고 있지만 1996년 이후로는 후퇴속도가 점차 감소하고 있는 것으로 보인다. 남쪽의 경우 해안선이 전진하고 있으나 연간 -1.5 m/yr 씩 전진속도가 감소하는 것으로 나타난다. 동쪽의 경우 해안선이 후퇴하다가 점차 전진하는 경향이 나타나며 기울기는 0.5 m/yr^2 정도로 전체기간과 1996년 이후 분석에서 서로 비슷하게 나타난다.

신자도

신자도의 NSM에서는 측선 22번과 23번을 기준으로 서쪽부분은 기준선 방향으로 전진하고, 동쪽부분은 후퇴하는 반시계 방향의 이동양상이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 3). 신자도의 SCE와 NSM의 절대적인 크기는 서쪽의 3개 측선(15번, 16번, 17번)과 동쪽의 중앙부를 제외하고 비슷한 양상을 보인다. 동쪽의 중앙은 SCE가 상대적으로 크게 나타나는데 앞서 진우도의 경우와 유사하게 관측기간동안 전진과 후퇴가 반복되는 과정이 존재했음을 의미한다. NSM의 양의 최대값은 4번 측선에서 관측된 633 m 이며 음의 최대값은 43번 측선에서 관측된 -800 m 이다.

신자도의 EPR, LRR, LMS에서도 NSM의 형태와 같이 측선 22번, 23번을 기준으로 반시계방향의 해안선 이동경향이 나타난다(Fig. 4a). 신자도의 서쪽은 해안선이 기준선 방향, 즉 외해방향으로 전진하고 있으며 이 구간에서 EPR, LRR, LMS의 평균은 각각 12.5 , 12.0 , 2.4 m/yr 로 나타난다. 반면에 신자도의 동쪽 지역의 경우 해안선이 후퇴하고 있으며 이 구간에서 EPR, LRR, LMS의 평균은 각

Fig. 6. Mean EPR at each time interval (black) with box plot and trend lines (blue, red) by linear regression analysis for each barrier islands of (a) Jinwoodo, (b) Shinjado, and (c) Doyodeung. In Fig. 6(a) and 6(b), the blue trend lines include mean EPR data from 1975 to 2009, and the red trend lines include mean EPR data form 1996 to 2009

Table 2. Linear regression analysis for mean EPR at different time interval

Island		Least regression analysis (m/yr ²)	
		1975~2009	1996~2009
Jinwoodo	West tail	0.3	2.9
	West	0.1	1.4
	South	0.2	-1.3
	East	0.6	0.5
Shinjado	West	-0.4	-0.5
	East	-0.7	0.0
Doyodeung		1975~2001	2002~2009
		1.2	4.2

각 -9.6, -11.9, -13.3 m/yr로 나타난다. 특히 신자도의 동쪽 꼬리부분인 측선 36번~44번 구간에서 빠른 속도로 후퇴하고 있으며 이 구간에서의 EPR, LRR, LMS 평균은 각각 -17.2, -19.1, -18.0 m/yr로 나타난다. R²는 측선 1번과 2번을 제외하고는 대부분의 구간에서 높게 나타나며 이는 신자도의 전체적인 해안선 변화가 일정한 방향으로 진행된다는 것을 의미한다. 신자도의 동쪽 및 서쪽의 LRR을 평균한 값은 Fig. 7에 제시되어 있다.

신자도에서 LMS는 서쪽에서 EPR과 LRR보다 상대적으로 작게 나타난다(Fig. 4a). 이는 과거에 해안선이 크게 전진한 기간을 제외하면 이 구간은 상대적으로 정체되어 있기 때문에, LMS에서는 변동폭이 큰 구간을 이상치로 판단하여 다른 지수들에 비해 낮은 값으로 계산된 것으로

보인다. 신자도는 1975년 영상에서 가운데가 잘린 두개의 사주 형태로 존재하다가 1987년 영상에서 하나의 울타리 섬으로 나타났고 1996년 영상에서 현재와 비슷한 형태를 띠게 되었다. LMS가 서측에서 상대적으로 작은 값으로 나타나는 이유는 신자도가 형성되는 과정에 따라 울타리 섬의 해안선 변화율의 차이가 나타나는 것으로 보이기 때문에 1996년 이후의 자료로 해안선 변화율을 재계산하였다.

현재와 비슷한 형태가 된 1996년 이후의 신자도 해안선에 대한 EPR, LRR, LMS는 Fig. 4b에 제시되어 있다. 진우도와 마찬가지로 여기에서도 조위차가 크게 나타나는 2001년 자료는 제외하였다. 신자도의 서쪽은 전진하는 것으로 보이나 낮은 변화율을 나타내고 상관계수도 낮게 나타나는 것으로 보아 1996년 이후로는 거의 정체되어 있는 것으로 판단된다. 신자도의 동쪽은 전체 기간의 결과와 마찬가지로 꾸준히 후퇴하고 있는 것으로 나타난다.

신자도의 mean EPR은 동쪽과 서쪽에서 모두 음의 값을 가진다(Fig. 6). 이러한 결과를 Fig. 7의 이동방향과 비교해보면 신자도 서쪽의 경우 전진하는 속도가 연간 -0.4 m/yr²로 느려지고 있으며 동쪽의 경우 후퇴속도가 -0.7 m/yr²로 빨라지고 있는 것으로 보인다(Table 2). 서쪽의 이동속도 감소는 앞서 LMS의 결과와 일치하는 것으로 과거에 크게 전진한 이후로는 현 상태를 일정하게 유지하고 있는 것으로 생각된다. 반면 동쪽은 Fig. 7에 제시된 바와 같이 2002년 이후로 꾸준히 후퇴하고 있는 것으로 보인다.

Fig. 7. LRR variation for each section in Shinjado. Red arrow indicates that coastline is progressed, whereas blue arrow indicates that coastline is regressed. LRR was calculated in different temporal data (from 1975 to 2009 and from 1996 to 2009, respectively), both of which show the different values locally in Shinjado

Fig. 8. (a) LRR variation for each section in Doyodeung since 1975. (b) LRR variation for each section in Doyodeung since 2002. Red arrow indicates that coastline is progressed, whereas blue arrow indicates that coastline is regressed

도요등

도요등의 NSM은 전체 구간에서 양의 값을 나타낸다 (Fig. 3). 이는 최초관측시점인 1975년 백합등 해안선에서 2009년의 도요등에 이르기까지 전 구간에서 전진하였다는 것을 의미한다. 그러나 SCE와 NSM의 격차가 전체 구간에서 크게 나타나는 것은 도요등이 현재의 형태를 갖추기 이전에 크게 후퇴하거나 마지막 관측시점보다 더욱 전진한 시기가 있었다는 것을 의미한다.

EPR과 LRR 또한 전체 구간에서 양의 값을 가지며 외해 방향으로 해안선이 이동되었다는 것을 지시한다(Fig. 4a). EPR과 LRR은 19.3~42.6 m/yr의 범위로 나타난다.

전 측선의 LRR을 평균한 값은 Fig. 8a에 제시되어 있다. EPR과 LRR이 전체 구간에서 양의 값을 나타내는 것에 비해 LMS는 대부분의 구간에서 음의 값, 즉 육상방향으로의 해안선 후퇴를 지시하는데 이는 LMS를 산정하는 과정에서 해안선이 크게 전진한 시기의 자료가 반영되지 않은 결과이다. 이러한 결과는 이 연구에서 도요등의 해안선을 생성하는 과정에서 과거 도요등이 생성되기 이전의 해안선으로 백합등을 선택한 것에 기인한 것으로 판단된다. 이 연구에 사용된 항공사진의 최초관측시점인 1975년에는 현재의 도요등은 보이지 않고 백합등이 낙동강 하구역 최남단의 울타리섬으로 존재한다. 그러나 백합등 남단에

Table 3. Summary of shoreline changes and their trends

		1975~2009		1996~2009	
		LRR (m/yr)	Gradient (m/yr ²)	LRR (m/yr)	Gradient (m/yr ²)
Jinwoodo	west tail	2.2	0.3	4.2	2.9
	west	-0.9	0.1	-1.9	1.4
	south	3.0	0.2	6.7	-1.5
	east	-2.5	0.6	2.1	0.5
Shinjado	west	12.0	-0.4	0.6	-0.5
	east	-11.9	-0.7	-16.0	0.0
		LRR (m/yr)		Gradient (m/yr ²)	
		1975~2009	31.2	1.2	
Doyodeung			west : 14.3		
		2002~2009	south : -18.2	4.2	
			east : 13.5		

사퇴의 발달이 진행되고 1996년에 촬영된 항공사진에서 섬의 형태를 갖추기 시작하면서 2001년 항공사진에서 현재의 도요등과 같은 형태가 관측된다. 이로 인해 NSM, EPR, LRR은 전체 관측기간동안 양의 값을 가지며 해안선이 꾸준히 외해방향으로 전진한 것으로 나타나는 것이다. 이러한 특성에 따라 도요등은 2001년을 기점으로 전, 후의 해안선을 각기 살펴볼 필요가 있으며 현재의 형태에 따라 기준선 및 측선의 형태도 달리 고려되어야 한다.

Fig. 8b에는 현재 도요등의 형태를 따르는 기준선 및 측선이 제시되어 있으며 Fig. 4b에는 조위차가 크게 나는 2001년 자료를 제외한 2002년~2009년의 해안선 변화율이 제시되어 있다. 도요등의 남쪽 측선 9번~31번은 도요등 형성 이후로 꾸준히 후퇴하고 있으며 동쪽과 서쪽은 확장되고 있는 것으로 보인다.

도요등의 전 측선 mean EPR은 형성 이전 해안선(백합등)과 이후를 구분하기 위하여 2001년 이전과 이후로 나누어 살펴보았다(Fig. 6). 1975년~2001년까지 해안선은 꾸준히 전진하였으며 연간 1.2 m/yr² 전진속도가 점차 빨라지고 있다(Table 2). 2002년~2009년에는 전체적으로 해안선이 후퇴하는 경향을 나타내지만 후퇴속도는 연간 4.2 m/yr²로 점차 느려지고 있다. 이는 Fig. 8b에서와 같이 도요등의 동쪽과 서쪽이 확장되는 특성에 기인하는 것으로 보인다.

4. 토 의

Table 3에는 각 울타리섬의 해안선 변화율과 해안선 변화율의 경향을 정리하였다. 해안선 변화율의 크기와 진행 방향은 낙동강 하구 지역에서 발생가능한 사회적 문제를

대비하기 위한 근거자료로 사용될 수 있다. 진우도 서쪽 꼬리는 서쪽으로 점차 확장되고 있는데 이는 진우도와 놀차도 사이에 위치한 협수로의 폭을 감소시키는 결과로 나타날 것이며 이 지역을 통과하는 선박들의 통행에 영향을 미칠 수 있다. 신자도의 서쪽 꼬리는 확장되는 것으로 보이지 않으나 진우도의 동쪽이 점차 전진하면서 수로의 폭을 줄이게 되고, 도요등 또한 동쪽과 서쪽으로 확장하면서 하구의 모든 협수로의 폭이 좁아질 것으로 예상된다. 이는 준설 및 준설로 인해 발생하는 부유사, 준설토 처리문제 등 여러 사회문제로 연결될 수 있으며, 장기적으로 준설은 선박의 통행로 확보를 위한 근본적인 대책이 될 수 없음을 시사한다. 신자도 서쪽은 현재의 위치에서 크게 이동할 것으로 보이지 않고 신자도 동쪽과 도요등은 1996년 이후 후퇴하고 있는 것으로 보인다. 그러나 진우도 남쪽은 점차 전진하고 있으며 그 추세는 일정기간 유지될 것으로 보인다. 해안선의 이동은 해저지형의 이동과 연결되어 일어나기 때문에 진우도 전면해역에 위치한 양식장들의 배치에 영향을 줄 수 있다.

낙동강 하구역의 울타리섬 해안선 변화율은 1975년 이후 일정한 방향으로 이동하는 것으로 보이나 그 속도는 기간에 따라 다르다. 특히 신자도와 도요등의 경우 1975년 이후로 섬의 형태변화가 크게 발생하였으나 최근 15년 사이에는 일정한 모양을 유지하고 있기 때문에 이러한 속도변화가 나타나는 것으로 생각된다. 진우도 서쪽 및 도요등과 같이 울타리섬의 해안선이 현재의 진행방향으로 점차 가속화되는 지역이 존재하는 반면, 신자도 동쪽과 같이 해안선의 이동속도가 일정하게 유지되는 지역도 존재한다. 또한 진우도 서쪽과 남쪽 그리고 신자도의 서쪽은 현재 진행방향으로 이동하고 있으며 점차 감속되는 지역이다. 1975년 이후의 자료로 분석한 결과에서는 울타리섬이 각각의 진행방향으로 꾸준히 이동하고 있는 것으로 보이나 각 울타리섬의 특성에 따라 최근 경향을 다시 살펴본 결과에서는 일부 구간을 제외하면 해안선의 이동경향이 점차 안정되어 가는 것으로 보인다.

원격탐사를 이용한 해안선 변화율 연구는 광범위한 자료를 손쉽게 얻을 수 있는 장점이 있지만 자료의 특성상 직접적인 관측보다 해안선 위치의 정확도가 떨어질 수 있다. 이 연구에 사용된 항공사진과 위성영상의 정확도는 각각 3 m/pixel과 2.5 m/pixel이며, 이를 해안선 변화율로 환산하면 3 m/yr와 2.5 m/yr가 된다. 이 수치는 2008년과 2009년 자료와 같이 시간간격이 1년인 경우에 계산된 것이며, 1975년과 1982년 자료처럼 서로의 시간간격이 큰 경우 해안선 변화율의 오차는 줄어들 수 있다. 이 연구에서 사용된 자료들의 평균적인 시간간격은 약 3년이며 이를 pixel 정확도에 의한 해안선 변화율의 오차로 환산하면 약 1 m/yr가 된다. 조위에 의한 오차도 이와 같은 방법으

로 계산해 볼 수 있다. 진우도, 신자도, 도요등의 해안선 경사를 고려한 해안선 이동거리는 조위 1 cm당 각각 0.8 m, 0.2 m, 0.5 m이며 각 이미지 사이의 조위차가 평균 10 cm 정도이므로 대략적인 해안선 변화율의 오차범위는 1~2.5 m/yr로 생각된다. 신자도의 경우 해안선 변화율이 약 10~20 m/yr의 범위를 보이고 도요등의 경우 20~40 m/yr의 범위에서 변화를 보이기 때문에 오차에 따른 크기의 변동은 존재할 수 있으나 이동경향에는 큰 차이가 없을 것으로 생각된다. 그러나 진우도의 경우 해안선 변화율의 크기가 3 m/yr 미만인 구간이 존재한다. 예를 들어 진우도의 1996년 이후의 결과를 살펴보면 진우도 서쪽 꼬리와 남쪽의 해안선 변화율은 신뢰할 수 있지만 서쪽과 동쪽의 해안선 변화율은 오차범위 이내에 있기 때문에 결과 해석에 유의하여야 한다(Fig. 5). 만일 지형변동이 거의 없을 것이라 예상되는 짧은 기간동안 다양한 조위에서 촬영된 여러 장의 영상들을 획득할 수 있다면 이를 통하여 원하는 고도의 해안선을 예상할 수 있을 것이다(Chen and Rau 1998).

이 연구에서 사용된 항공사진 및 위성영상으로 분석한 해안선 변화율은 자료가 가진 오차에 의해 진우도 일부 구역의 해안선 변화율이 모호한 것으로 확인되었다. 그러나 이 연구에서 사용된 자료보다 정확도가 더욱 떨어지는 자료를 사용할 경우 해안선 변화율이 모호한 구역이 더욱 커질 수 있다. 예를 들어 Landsat 위성의 15 m/pixel 해상도를 가지는 영상을 매년 분석하게 되면 pixel 오차에 의한 해안선 변화율의 오차는 15 m/yr가 되며 여기에 조위에 의한 오차가 포함되면 진우도 전체, 그리고 신자도 일부 구역의 해안선 변화율도 오차범위에 포함된다. 이 연구에서 계산된 해안선 변화율의 분포를 고려하면, 자료의 정확도에 따라 발생하는 해안선 변화율의 오차가 1 m/yr 보다 작아야 전체 구간의 해안선 변화율을 신뢰할 수 있을 것으로 보인다.

도요등의 해안선 변화율은 연구자에 따라 시각차가 다른 것으로 확인되었다. 선행연구에서 김 등 (2007)은 이 연구와 동일하게 백합등을 포함한 해안선을 추출하여 도요등은 전반적으로 외해방향으로 전진하였으나 1993년 이후에는 육지쪽으로 후퇴하였다고 보고하였다. 그러나 오 등 (2010)은 도요등의 과거 해안선으로 백합등을 고려하지 않아서 울타리섬이 전반적으로 육지쪽으로 후퇴한다고 보고하였다. 이는 해안선 선정에 대한 관점의 차이 때문이며 연구결과가 상반되는 것은 아닌 것으로 판단된다. 오 등 (2010)의 결과는 이 연구에서 2002년 이후의 자료로 계산된 도요등의 해안선 변화율과 같은 경향을 나타내며 이는 도요등이 형성된 이후의 결과로 판단되어야 하며 백합등을 포함시킨 결과와는 달리 고려해야 한다. 따라서 기준선 및 측선을 어떻게 구성하느냐에 따라 연구 결과가

달라질 수 있는 것으로 확인되었다. 김 등 (2007), 오 등 (2010) 그리고 이 연구에서의 결과로 낙동강 하구역 울타리섬들의 이동경향을 분석하기 위해서는 해안선을 세밀하게 나누어 살펴볼 필요가 있었다. 그리고 측선을 어디까지 확장하느냐에 따라 장기적인 해안선 변화율의 경향이 달라질 수 있다. 또한 이 연구에서는 울타리섬 동쪽 및 서쪽의 해안선 변동이 일정하게 진행되고 있음을 확인하였다. 그러므로 울타리섬의 이동특성을 살펴보기 위해서는 울타리섬의 외해방향 뿐만 아니라 동쪽과 서쪽 꼬리까지 기준선과 측선을 확장할 필요가 있다.

통계적 기법을 사용한 분석은 표본의 개수가 많을수록 더욱 신뢰할 만한 결과가 도출되는 것은 주지의 사실이지만 이 연구와 같이 장기간의 해안선변화율을 통계분석하는 것에 있어 과연 어느 정도의 표본이 수집되어야 신뢰할만한 결과가 도출될지는 그 기준이 모호하다. 해안선변화율은 해안선이 선형적으로 변한다는 것을 가정하지만 계절 특성 또는 태풍과 폭우 등의 특별한 사건에 의해서 민감하게 반응할 수 있다. 낙동강 하구역과 같이 인위적인 환경변동이 산업화와 함께 끊임없이 진행된 경우 선형적인 변동에서 벗어나는 결과가 도출될 수 있다. 이 연구에서는 전반적으로 해안선 변화율이 일정하게 유지되는 것으로 보이지만 일부 LMS가 EPR 및 LRR과는 다른 결과를 제시하는 경우가 발생하였다. 이러한 이상값에 의한 왜곡을 제거하고 보다 정확한 해안선 분석을 위해서는 장기간 그리고 다량의 자료를 수집해야 하며 지형변화에 대해 꾸준한 모니터링 활동이 요구된다. 더불어 조위와 기상 등을 고려하여 목적에 부합하는 결과를 얻을 수 있도록 장기적인 관측계획의 수립이 필요하다.

5. 결 론

이 연구에서는 1975년부터 2009년까지 총 12매의 항공사진(3 m/pixel)과 위성영상(2.5 m/pixel)을 Canny Edge Detector를 이용하여 낙동강 하구역 울타리섬들의 해안선을 추출하였고 수치해안선분석시스템을 사용하여 해안선 변화율을 산정하였다. 해안선 변화율의 경향을 통계적으로 분석하여 울타리섬들의 장기적인 해안선 변화를 확인하였다.

해안선 변화율은 각 울타리섬들 사이뿐만 아니라 울타리섬의 지역별로 다양하게 나타난다. 진우도의 경우 서쪽 꼬리부분, 서쪽, 남쪽, 동쪽은 각각 2.2 m/yr, -0.9 m/yr, 3.0 m/yr, -2.5 m/yr의 이동경향을 보이며 1975년 이후로 0.3 m/yr², 0.1 m/yr², 0.2 m/yr², 0.6 m/yr²씩 이동속도가 증가하고 있다. 1996년 이후로는 각각 4.2 m/yr, -1.9 m/yr, 6.7 m/yr, 2.1 m/yr의 이동경향을 나타냈고 2.9 m/yr², 1.4 m/yr², -1.5 m/yr², 0.5 m/yr²씩 이동속도가 증가하고 있다. 진

우도의 경우 일부 지역에서 오차범위 내의 낮은 변화율을 보이지만 대체적으로 1996년 이후로 해안선 변화가 증가되고 있는 것으로 보인다.

신자도의 경우 서쪽은 12.0 m/yr로 전진하고 동쪽은 -11.9 m/yr로 후진하는 반시계방향의 회전양상을 나타낸다. 서쪽(-0.4 m/yr²)과 동쪽(-0.7 m/yr²)의 해안선 변화율의 경향은 서쪽의 전진속도는 감소하고, 동쪽의 후진속도는 증가함을 의미한다. 신자도가 현재와 비슷한 형태로 형성된 1996년 이후로 서쪽은 0.6 m/yr로 정체되어 있으며 동쪽은 -16.0 m/yr로 과거보다 더욱 빨리 후퇴하는 것으로 나타난다. 해안선 변화율의 경향은 각각 -0.5 m/yr²와 0 m/yr²로 서쪽의 전진속도는 더욱 느려질 것으로 보이며 동쪽은 현재와 비슷한 속도로 일정하게 후퇴할 것으로 생각된다.

도요등은 1975년 이후로 31.6 m/yr로 전진하고 있으나 2002년 이후로 남쪽은 -18.2 m/yr, 동·서쪽은 각각 13.5 m/yr, 14.3 m/yr로 확장되고 있다. 해안선 변화율의 경향은 1975년~2001년에 걸쳐 연간 1.2 m/yr²씩 증가하지만, 2002년~2009년에는 연간 4.2 m/yr²씩 증가하고 있다.

사 사

이 연구는 부산신항건설사무소의 재원으로 한국해양과학기술원(낙동강 하구 울타리섬 지형변동(1-6차))과 2012년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “운용해양(해양예보)시스템 연구”의 일환으로 수행되었다. 논문을 심사해 주시고 훌륭한 지적을 아끼지 않으신 익명의 두 심사위원님과 편집위원께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- 김백운, 김부근, 이상룡 (2005) 낙동강 하구 해안선변화 연구를 위한 모자이크 항공사진의 구축. *Ocean and Polar Res* 27(4):497-507
- 김백운, 김부근, 이상룡 (2007) 낙동강 하구역 울타리 섬의 해안선 변화율. *한국해양공학학회지* 19(4):361-374
- 김성환 (2005) 낙동강 하구둑 건설과 삼각주연안 사주섬 지형변화. 이학박사 학위논문, 서울대학교, 72 p
- 부산광역시 (2008) 낙동강하구 생태계모니터링 (2007~2008), 부산발전연구원
- 오건환 (1988) 낙동강 하구둑 건설로 인한 삼각주 말단의 지형변화. *낙동강* 7:38-47
- 오건환 (1999) 낙동강 삼각주 말단의 지형변화. *한국제4기학회지* 13(1):67-78
- 오치영, 박소영, 최철웅, 전성우 (2010) 위성영상과 GIS를 이용한 낙동강하구 지형변화 탐지. *한국지형공간정보학회지* 18(1):21-29
- 유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006) 해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화. *한국해양공학학회지* 20(6):54-60
- Bailey B, Nowell D (1996) Techniques for monitoring coastal change: A review and case study. *Ocean Coast Manag* 32(2):85-95
- Canny J (1986) A Computational approach to edge detection. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 8(6):679-698
- Carter RWG (1988) Coastal environments. Academic Press, London, U.K.
- Corwell M, Leatherman SP, Buckley MK (1991) Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *J Coast Res* 7(3):839-852
- Chen LC, Rau JY (1998) Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images. *Int J Remote Sens* 19(17):3383-3397
- Dolan R, Fenster MS, Holme SJ (1991) Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *J Coast Res* 7(3):723-744
- Moore LJ (2000) Shoreline mapping techniques. *J Coast Res* 16(1):111-124
- Morton RA, Miller TL, Moore LJ (2004) National assessment of shoreline change: Part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of Mexico. U.S. Geological Survey, Open File Report 2004-1043, 44 p
- Rousseeuw PJ (1984) Least median of squares regression. *J Am Stat Assoc* 79(388):871-890
- Thieler ER, Himmelstoss EA, Zichichi JL, Ergul, Ayhan (2009) Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2008-1278

Received Sep. 7, 2012

Revised Dec. 24, 2012

Accepted Dec. 28, 2012