한국해안 · 해양공학회지
제 19 권 제 4 호, pp. 361~374, 2007년 8월

낙동강 하구역 울타리 섬의 해안선 변화율
Rate of Shoreline Changes for Barrier Islands in Nakdong Estuary

김백운* · 김부근** · 이상룡**
Baeck Oon Kim*, Boo Keun Khim** and Sang Ryong Lee**

요 지 : 본 연구는 항공사진을 이용하여 낙동강 하구 울타리 섬의 장기간의 지형 변화를 제시한다. 수치사진측량을 이용하여 모자이크 항공사진을 구축하고 이로부터 1975년부터 2001년까지 6회의 해안선 자료를 산출한다. GIS에 근거한 수치해안선분석시스템을 이용하여 EPR(End Point Rate), JKR(Jackknife Rate) 및 LRR(Linear Regression Rate)와 같은 3 종류의 해안선 변화율을 산정한다. 신자도와 도요등에서 매우 현격한 변화가 나타났다. 신자도의 서쪽 부분은 바다 쪽으로 전진한 반면 동쪽 부분은 육지 쪽으로 후퇴하였으며, 이 결과 섬이 반시계 방향으로 회전한 것처럼 보인다. 양쪽 끝 부분에서 해안선 변화율은 20 m/yr에 달한다. 도요등은 1993년에 백합등 전면에 새롭게 출현하였으며 40 m/yr의 해안선 변화율로 전진하였다. 해안선 변화율은 울타리 섬 내에서 뿐만 아니라 울타리 섬 간에도 차이가 있으며, 동쪽으로 가면서 증가하는 경향을 보인다. 이러한 해안선 변화율의 공간적인 변동성을 이해하기 위해서는 연안개발이 수리역학과 퇴적작용에 미치는 영향을 상세히 조사할 필요가 있다.

핵심용어 : 해안선 변화율, 항공사진, 수치사진측량, 낙동강 하구, 울타리 섬

Abstract : This study presents long-term shoreline changes of barrier islands in Nakdong Estuary using aerial photographs. Digital photogrammetry is used for constructing mosaic aerial photographs, which yield six sets of shoreline data ranging from 1975 to 2001. Three kinds of rate of shoreline changes such as EPR (End Point Rate), JKR (Jackknife Rate) and LRR (Linear Regression Rate) are computed by a GIS-based Digital Shoreline Analysis Systems. There have been remarkable changes both in Sinja Island and Doyodeung. Western part of Sinja Island advanced seaward, whereas eastern part retreated landward, giving appearance that the island rotated counterclockwise. Rate of shoreline changes at both ends reach 20 m/yr. Doyodeung occurred newly in front of Baekhapdeung in 1993, resulting in shoreline advance in a rate of 40 m/yr. Rate of shoreline changes differ both within and between barrier islands and have a tendency to increase eastward. To understand this spatial variability of rate of shoreline changes, it is suggested to make a detailed investigation into the impact of coastal development on hydrodynamic and sedimentary processes.

Keywords : rate of shoreline change, aerial photograph, digital photogrammetry, Nakdong Estuary, barrier islands

1. 서 론

해빈, 해안사구 등 연안지형의 변화를 조사하기 위해서는 장기간의 해안선변화 자료를 구축하는 것이 일반적인 방법이다(Baily and Nowell, 1996; Moore, 2000; Morton et al., 2004). 해안선이 연안지형을 대표한다고 가정할 경우 해안선의 변화(전진 또는 후퇴)는 실제로 3차원 지형의 변화에 의한 것으로 간주한다. 해안선은 자연적인 현상과 인위적인 요인에 의하여 끊임없이 변화한다. 이러한 해안선 변화에는 계절적인 단기변화와 더불어 기후, 퇴적환경, 해수면 등 여러 가지 요인에 의한 장기변화가 공존한다. 장기간의 해안선 변화율은 향후 해안선 변화의 방향을 예측하고, 이에 적합한 연안관리 정책을 수립하는데 매우 중요한 역할을 한다.

장기간의 해안선변화에 관한 정보는 지형도, 해도, 지상사진, 항공사진, 위성사진 등 다양한 종류의 자료로부터 취

*군산대학교 새만금환경연구센터(SERC, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea. bkim@kunsan.ac.kr)
**부산대학교 지구환경시스템학부(Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)

득된다. 그런데 지형도나 해도는 어느 한 순간의 지형 영상을 기록한 항공사진과 달리 상당한 기간동안 편집 과정을 거치므로 해안선 작성 시기가 모호한 경우가 있다(Baily and Nowell, 1996). 항공사진은 시공간적인 규모 또는 해상도와 같은 측면에서 지상사진이나 위성사진 보다 장점이 많기 때문에 장기간 해안선변화 자료 구축에 널리 사용되고 있다. 해안선변화 자료 구축을 위한 항공사진 분석 방법은 정확도, 경제성, 전문성 등에 따라서 다양하게 개발되어 왔다(Moore, 2000). 기계적인 방법으로 단사진을 분석할 당시에는 가시적으로 뚜렷한 고조선(High Water Line)의 수평좌표로서 해안선자료를 구축하는 것이 일반적이었다. 이 방법은 해안선 인식을 주관적인 판단에 의존하기 때문에 해안선 위치에 대한 오차가 매우 크게 나타날 수 있다(Morton and Speed, 1998; Ruggiero et al., 2003). 그러나 수치사진측량(digital photogrammetry)이 출현하면서 수치적 입체모형으로부터 3차원 지형정보(DEM) 추출이 가능하게 되었으며, 이로써 보다 객관적인 조위 수준면 기준에 의한 해안선 추출이 가능하게 되었다(Hapke and Richmond, 2000).

낙동강 하구 연안지역은 1930년대에 건설된 녹산수문을 비롯하여 1980년대 이후 하구둑, 녹산공단, 연안매립, 신항만 건설 등 지속적인 연안개발로 인하여 2007년 구글 어스(Google Earth)의 인공위성 영상과 같이 대부분의 해안선이 인공적인 형태를 나타내게 되었다(Fig. 1). 이와 같이 약 80년간에 걸쳐 진행된 인위적인 해안선 변화, 서낙동강의 폐쇄 그리고 동낙동강 유출수량의 인위적인 조절은 낙동강 하구에서의 해수와 물질 순환구조뿐만 아니라 하구 전면에 발달한 울타리 섬의 지형에 지대한 영향을 주었다(장과 김, 2006). 따라서 울타리 섬의 지형변화와 이와 관련된 지질해양학, 해양공학, 생태학적 연구가 다수 진행되었으며, 특히 김(2005)과 유 등(2006)은 지형변화의 정량적인 분석 연구를 수행하였다. 김(2005)은 해석도화기(analytical plotter)를 이용하여 낙동강 하구둑 건설 이후 1987년, 1996년, 2001년의 항공사진으로부터 삼각주 연안사주(울타리 섬)의 해안선 자료를 구축한 다음 울타리 섬의 면적과 형태 변화를 분석하였다. 유 등(2006)은 1927년부터 발행된 총 6개의 1:50,000 수치 해도를 이용하여 낙동강 하구를 임의의 3지역으로 구분하고, 각 지역에서의 대표적인 단면에 근거한 울타리 섬 간의 거리와 수심의 변화 그리고 조간대와 울타리 섬의 면적 변화를 분석하였다.

본 연구에서는 낙동강 하구 울타리 섬에 대한 장기간의 해안선 변화율을 산정하고, 이에 대한 공간적인 변동 특성

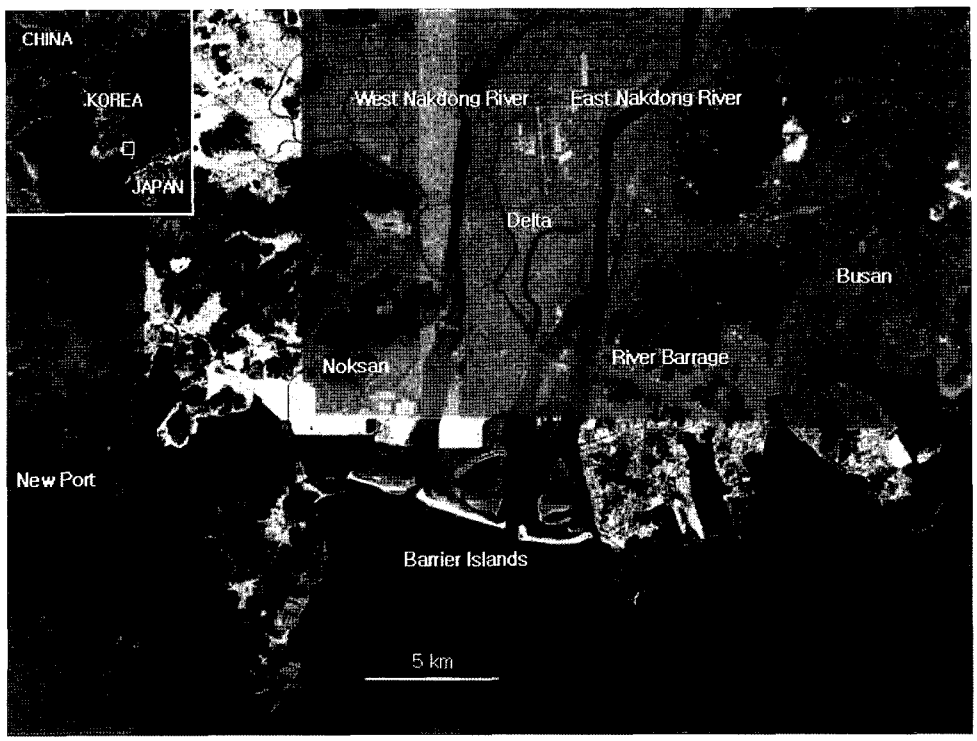

Fig. 1. Satellite image showing study area (Google Earth, 2007).

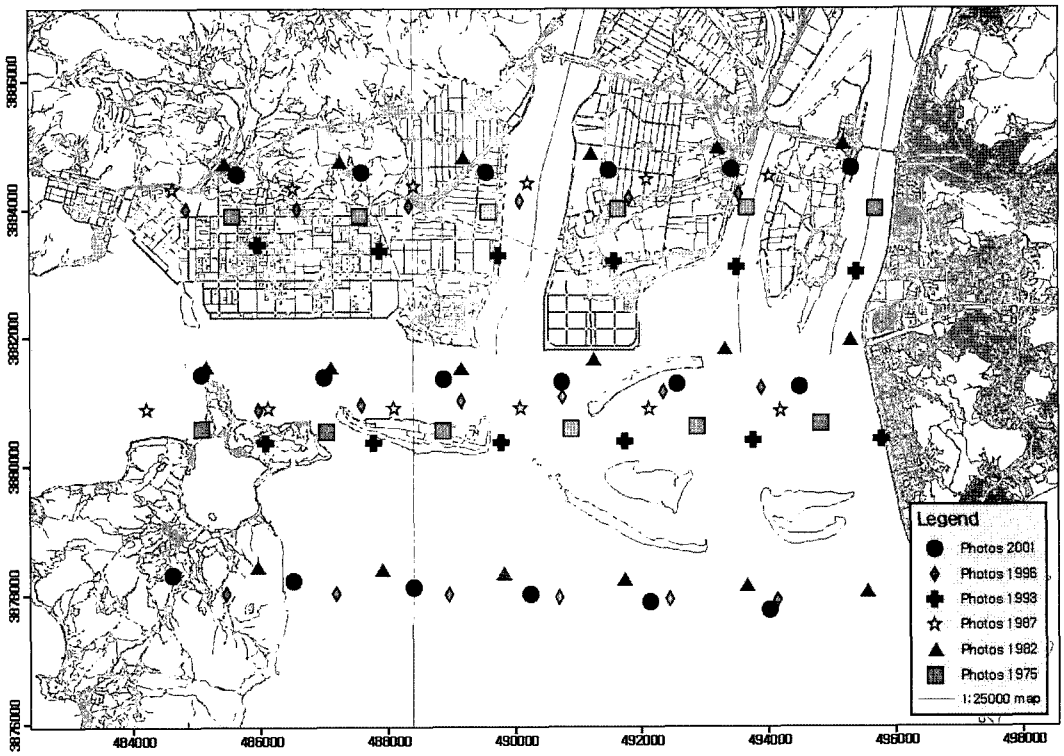

Fig. 2. Map showing positions of aerial photographs.

을 파악하고자 한다. 이를 위하여 1975년부터 2001년까지 6회에 걸쳐 촬영된 항공사진을 김 등(2005)이 제시한 수치사진측량 방법으로 모자이크 항공사진을 제작하고, 고조선에 근거하여 년도별 해안선을 추출한다. 이러한 해안선 자료에 Thieler and Danforth (1994)와 Thieler et al.(2005)이 GIS 분석 방법을 응용하여 개발한 수치해안선분석시스템(Digital Shoreline Analysis Systems)을 적용함으로써 장기간의 해안선 변화율을 산정한다.

2. 항공사진 분석

2.1 수치사진측량

최근 컴퓨터와 주변기기의 발전에 의하여 수치사진측량은 항공사진을 분석하기 위한 정확하고 경제적인 방법으로 부각되고 있다(Thieler and Danforth, 1994; Moor, 2000; Hapke and Richmond, 2000). 본 연구에서는 Leica Geosystems 사의 Leica Photogrammetry Suite(LPS)의 소프트웨어를 이용하여 낙동강 하구 지역의 항공사진을 분석하고, 이로부터 장기간의 해안선 변화 자료를 구축한다(김 등, 2005).

LPS는 항공기의 운항 경로를 따라 중첩 촬영된 항공사진을 번들 조정(bundle adjustment)으로 해석한다. 번들조정법은 지상기준점(Ground Control Point; GCP)과 접합점(tie point)을 이용하여 2개 이상의 단위를 동시에 절대 표정하는 블록조정(block adjustment)의 일종으로서 사진을 기본단위로 사용하여 다수의 번들을 공선조건(collinearity condition)에 따라 표정한다. 각각의 사진에서 외부표정요소인 사진 촬영점의 3차원 공간좌표(Xo, Yo, Zo)와 회전각(ω, ϕ, κ)은 미지수로 주어진다. 번들조정법으로 6개의 외부표정요소와 미지 접합점의 3차원 좌표값에 대한 해를 구할 수 있다. 이 방법은 블록조정 방법에서 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 한편, 단일 항공사진과 달리 항공사진 블록을 해석하는데 따르는 장점은 항공사진 해석에 필수적인 지상기준점을 효율적으로 사용할 수 있다는 것이다. 장기간의 해안선 변화 연구에서 시간적으로 변하지 않은 지상기준점의 발견은 쉽지 않을 뿐만 아니라 연안 지역에서 지상기준점은 육지에 편중하여 분포하는 특징이 있다. 항공사진의 블록을 분석하는 경우 중첩된 사진에서 공통으로 발견되는 접합점을 이용할 수 있기 때문에 지상기준점의 부족과 육지 편중의 문제를 어느 정도 극복할 수 있다.

장기간 해안선변화 연구에서 지상기준점은 시간적으로

변하지 않은 지형지물을 선정하는 것이 유리하다. 그 이유는 첫째, 동일한 지상기준점을 사용함으로써 년도별 항공사진 분석의 오차 비교가 용이하며 둘째, 년도별로 상이한 지상기준점을 사용할 경우 지상기준점의 수가 증가함으로써 지상기준점 선정 작업과 LPS에서의 지상기준점 측정 작업의 효율이 저하된다. 그러나 시간적으로 변하지 않은 지상기준점의 선정은 초기 단계에서 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

LPS를 이용하여 항공사진 블록을 분석하는 과정은 김 등(2005)의 Fig. 2에 도시한 바와 같다. 전체적으로 분석 흐름도는 세 부분으로 구분된다. 항공사진, 1:5,000 수치지도를 이용한 지상기준점, 수치표고모형(Digital Elevation Model; DEM)은 입력자료에 해당되며, 정사투영항공사진 및 모자이크 항공사진은 출력자료가 된다. 이 중간에 내부표정, 외부표정, 항공삼각측량(triangulation), 항공삼각측량 오차 평가 등 여러 가지 LPS의 작업 과정이 수행된다.

Table 1은 국토지리정보원에서 낙동강 하구 지역을 대상으로 촬영한 1:20,000 항공사진의 목록을 정리한 것이다. 항공사진의 주점(principal point)을 1:25,000 수치지도에 도시한 바와 같이 년도별 촬영코스는 일정하지 않았으며(Fig. 2), 낙동강 하구 지역의 항공사진 블록은 년도에 따라 12 또는 18매의 사진으로 구성되었다. 항공사진은 비측량용(non-metric) 독취기를 이용하여 해상도 600 dpi 수준의 수치영상으로 변환되었다. 국토지리정보원 고시(제 2006-569호) 항공사진측량작업내규의 규정(최소 1,200 dpi)보다 낮은 해상도의 수치영상을 사용한 이유는 낙동강 하구 울타리 섬의 해안선 변화의 규모가 일반적인 항공사진의 분석 오차보다 큰 것으로 파악되었으며(김 등, 2005), 컴퓨터 처리 용량 및 분석 시간을 고려할 때 경제적인 효과가 크다고 판단하였기 때문이다.

Table 1. Inventory of 1:20,000 aerial photographs.

Year	Title	Course No.	Photo No.	Total No. of photos
1975	Gyeongsang	18	18~23	12
		19	17~22	
1982	Daegu Busan	43	18~23	18
		44	17~22	
		45	19~24	
1987	Gyeongsang	43	56~61	12
		44	55~60	
1993	Busan	23	54~59	12
		24	53~58	
1996	Changwon	31	37~42	18
		32	33~38	
		33	29~34	
2001	Busan	24	18~23	18
		25	17~22	
		26	8~13	

상기의 년도별 항공사진 블록이 김 등(2005)에 기술된 LPS 작업을 통하여 모자이크 항공사진으로 제작되는 과정에서 특기할 사항은 본 연구지역에서의 지상기준점은 주로 육지에 분포하고 있기 때문에 지상기준점 만으로는 항공삼각측량을 완전하게 수행할 수 없다는 점이다. 이를 해결하기 위하여 중첩된 사진에서 자동 추출된 접합점 중 해안선에 근접한 것들을 수직적인 지상기준점(vertical GCP)으로 변환하여 항공삼각측량에 이용하였다. 이러한 항공사진 분석 결과는 LPS에서 제공되는 항공삼각측량의 오차 분석 결과를 이용하여 평가할 수 있다(Table 2). 표준오차는 총 영상단위가중치 RMS 오차(total image unit-weight RMSE)를 나타내며, 이는 항공삼각측량 해의 전체적인 품질을 지시한다. 일반적으로 표준오차가 작을수록 관측치의 잔차가 작다는 것을 의미한다. 모든 년도에서 항공삼각측량의 표준오차는 1차에 비하여 2차에서 감소하고 있다.

년도별 항공사진에서 지상기준점의 RMS 오차 범위는 평면좌표는 0.8~3.9 m, 수직좌표는 0.5~1.5 m의 범위를 보인다(Table 2). 이러한 RMS 오차는 국토지리정보원 고시 항공사진측량작업내규의 대지표정 표준오차(평면 0.8 m, 표고 0.6 m)에 비하여 큰 값이라고 할 수 있다. 이는 본 연구에서 비측량용 독취기를 이용한 항공사진의 수치영상 작성, 낮

Table 2. Error analysis for triangulation parameters.

Year \ Error	Triangulation 1				Triangulation 2			
	Standard error (pixel)	RMSE of GCP (m)			Standard error (pixel)	RMSE of GCP (m)		
		X	Y	Z		X	Y	Z
1975	0.52	0.83	1.15	0.66	0.46	1.04	1.05	0.63
1982	1.67	1.66	1.85	3.01	1.31	3.39	3.85	1.50
1987	0.55	0.60	0.68	2.54	0.39	0.95	0.88	0.46
1993	0.58	0.39	1.31	1.24	0.45	0.80	1.31	0.60
1996	0.81	0.74	1.21	1.51	0.58	1.24	1.53	0.84
2001	0.66	0.73	0.62	0.65	0.57	1.46	0.91	0.87

은 해상도, 수치지도를 이용한 지상기준점 선정 등에 기인한다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 오차 수준은 울타리 섬의 해안선 변화가 오차 수준 이상으로 나타났기 때문에 해안선변화 분석에 충분한 것으로 사료된다.

2.2 해안선 변화 자료

Figs. 3~8은 LPS의 모자이크 툴을 이용하여 항공사진 블록을 합성한 모자이크 항공사진을 도시한 것이다. 모자이크 항공사진은 영상 화소 1.5 m 규모로 제작되었다. 년

Fig. 3. Mosaic aerial photograph, 1975.

Fig. 4. Mosaic aerial photograph, 1982.

Fig. 5. Mosaic aerial photograph, 1987.

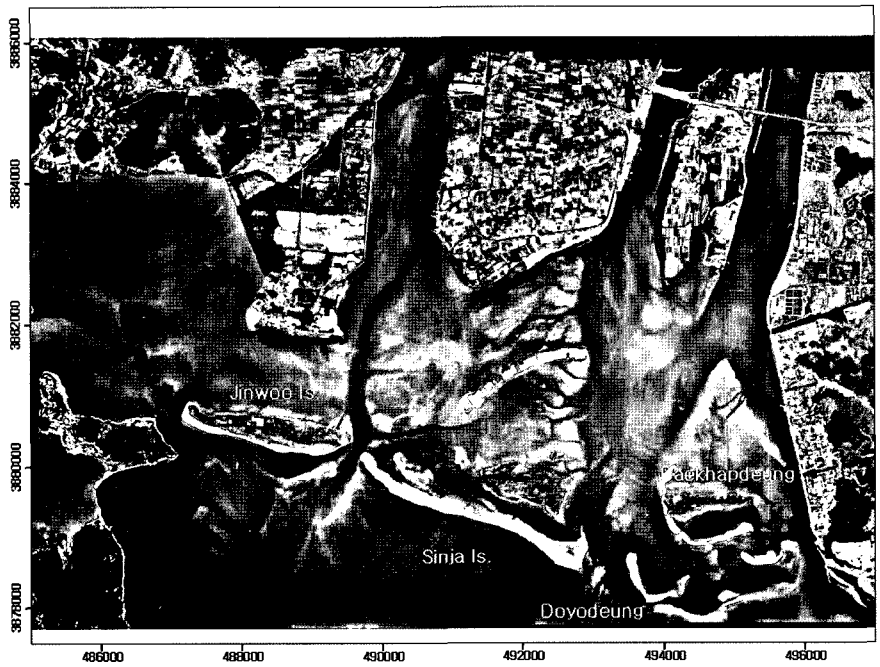

Fig. 6. Mosaic aerial photograph, 1993.

도별 모자이크 항공사진으로부터 울타리 섬 해안선을 추출하여 1:25,000 수치지도에 도시하였다(Fig. 9). 본 연구에서 해안선은 고조선을 따라 도화하였다. 신자도, 도요등 및 진우도의 남측 해안에는 급경사의 모래 해빈이 발달하고 있어 고조선의 인식은 비교적 용이하였다. 그러나 장자도, 백합등 및 진우도의 북측 해안은 경사가 완만한 조간대로

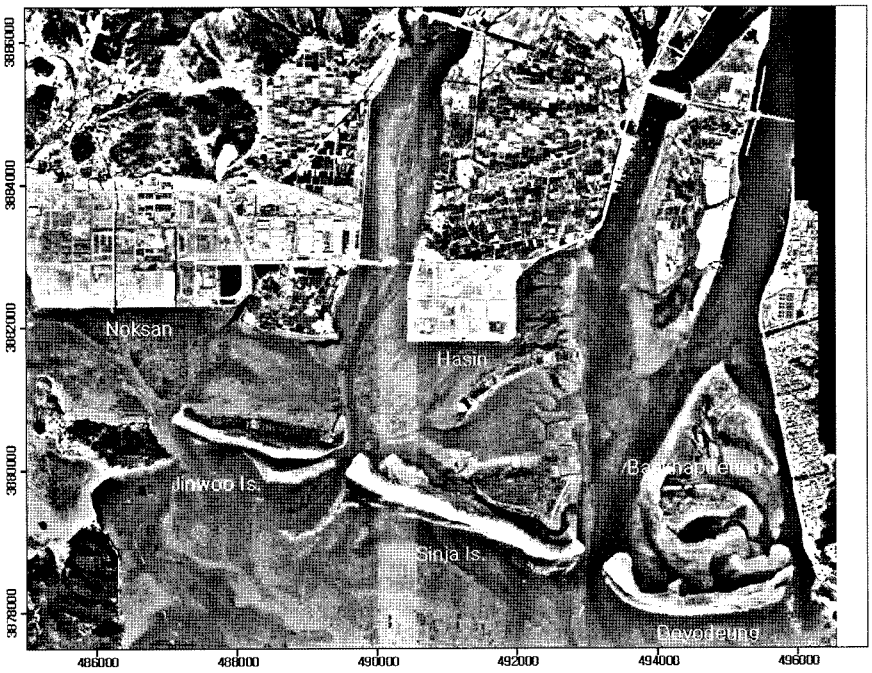

Fig. 7. Mosaic aerial photograph, 1996.

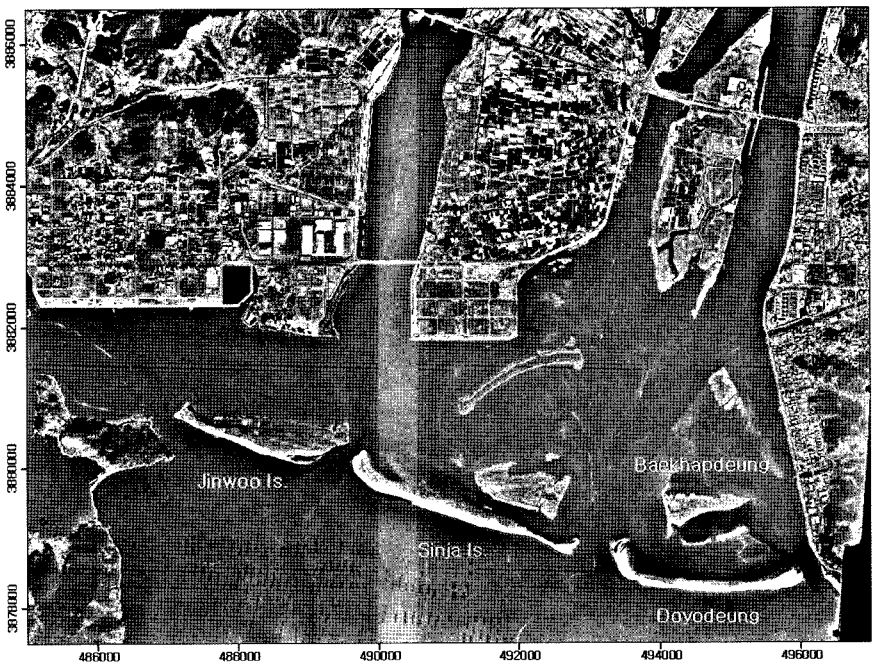

Fig. 8. Mosaic aerial photograph, 2001.

이루어져 있으며, 식생이 발달하고 있기 때문에 고조선 인식에 오차가 크게 발생할 수 있다. 따라서 장기간 해안선 변화 분석은 해빈의 발달이 우세한 지역으로 한정하였다.

년도별 모자이크 항공사진(Figs. 3~8)과 이로부터 추출된 해안선 자료(Fig. 9)에 근거하여 낙동강 하구 연안지역의 지형변화를 인위적인 해안선 변화와 더불어 개략적으

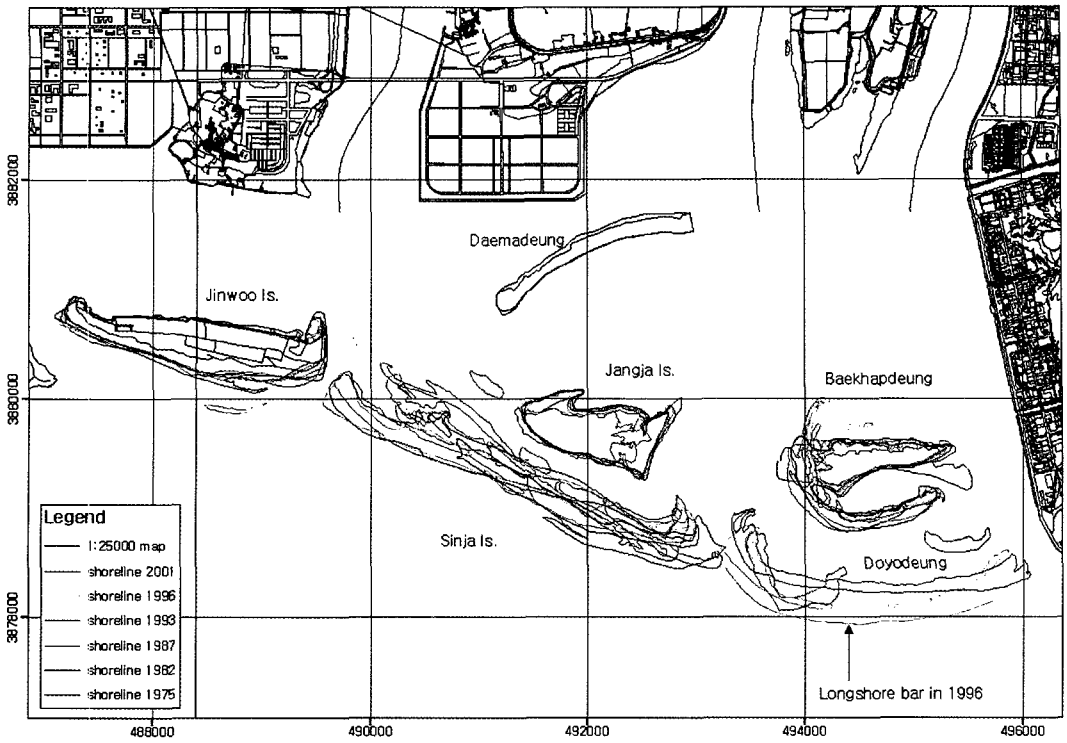

Fig. 9. Map showing shorelines of barrier islands.

로 살펴본다. 1975년부터 2001년까지 진우도의 해안선 변화는 뚜렷하지 않은 반면, 신자도, 백합등 및 도요등의 지형변화는 매우 크게 나타났다. 이러한 현상에 대하여 김(2005)은 낙동강 본류의 유로변경이 이루어진 1934년 이후 동낙동강에서의 하천수 유출에 의한 퇴적지형의 형성이 활발하였기 때문이라고 해석하였다.

2.2.1 1975년

서낙동강 서측으로 공단과 택지 조성을 위한 간척으로 인하여 신호도는 육지와 연결되어 있으며, 동낙동강 동측으로 도시개발로 인하여 하단 지역의 해안선 정비가 이루어지고 있다. 장자도 남측에 있는 신자도는 두 개의 섬으로 분리되어 있으며, 이는 항행 통로를 위해서 인공적으로 형성한 것이라는 보고가 있으나 확인하지 못하였다.

2.2.2 1982년

분리되었던 신자도가 하나의 섬으로 합쳐진 형태를 보인다. 백합등은 서쪽 끝에서 동쪽 방향으로 사주가 발달하여 전체적으로 ㄷ자 형태를 보인다. 김(2005)은 1987년의 삼각주 연안사주 해안선에 대하여 "백합등의 경우 1950년대 최초로 출현하여 지속적인 퇴적과정의 활성화에 따라 바로 남쪽으로 형성된 나무싯등과 연결되어 현재의 모양을 보이고 있다"라고 기술하였다. 한편, 김 등(2003)은 1986년에 발행된 지형도(국토지리정보원)에는 백합등의 남쪽으로 나무싯등이 나타나 백합등과 서쪽부분이 서로 연결된다고 기술하였다. 이와 달리 1983년 해도(국립해양조사원)에는 백합등과 나무싯등이 연결된 모습을 보이고 있다(유 등, 2006; Fig. 4참조). 따라서 백합등의 ㄷ자 형태는 1975년과 1982년 사이에 백합등과 나무싯등이 서로 연결된 결과로서 해석된다.

2.2.3 1987년

동낙동강과 을숙도에 1987년에 완공된 하구둑을 볼 수 있다. 을숙도의 북동측이 준설에 의하여 사라진 결과 을숙도의 면적은 감소되고, 동낙동강 동측 지류는 폭이 넓어짐과 동시에 직선화되어 있다. 동낙동강 동측 장림 지역에서 매립으로 인하여 해안선의 직선화가 뚜렷하다. 신자도는 북서쪽으로 크게 신장되어 있으며, 백합등의 ㄷ자 형태는 더욱 성장한 모습을 보인다.

2.2.4 1993년

진우도의 동남측에 소규모의 사주가 출현하며, 신자도의 지형 변화가 뚜렷하다. 여전히 ㄷ자 형태를 보이는 백합등 남측으로 몇 개의 소규모 속등(도요등)이 분산된 형태로서

새로이 출현한다. 이러한 도요등은 1993년 이전에 형성되기 시작한 것으로 판단된다.

2.2.5 1996년

녹산공단과 하신 지역에서 간척으로 인하여 인공적인 해안선이 형성되어 있으며, 이 두 지역을 연결하는 녹산대교가 건설 중이다. 1993년에 진우도 동남측에 출현한 사주가 존재하고 있다. 반면 백합등의 경우 나무싯등의 면적이 감소되고 분리되어 더 이상 ㄷ자 형태를 보이지 않고 있다. 도요등은 소규모 속등이 분산된 형태에서 중앙부가 분리되었지만 동서 방향으로 대규모의 초승달 형태를 보이는 울타리 섬으로 나타난다. 또한, 도요등 전면에는 연속성이 탁월한 longshore bar가 발달하고 있다. 본 연구에서는 이러한 longshore bar의 수평위치를 해안선 자료에 추가하여 도화하였다(Fig. 4참조). 이와 관련하여 김(2005)은 "연안사주의 형태변화 측면에서 볼 때, 도요등이 백합등의 남쪽에서 출현하여 성장하게 되어 새롭게 진우도와 신자도, 도요등으로 이어지는 1996년의 해안선을 형성하는 것이 두드러진다"고 기술하였다.

2.2.6 2001년

1996년과 마찬가지로 현재 해안선을 형성하고 있는 울타리 섬인 진우도, 신자도, 도요등으로 해안선을 구성한다. 진우도에서는 1993년과 1996년에 나타난 사주가 사라진 대신 새로운 사취가 진우도의 동쪽 방향으로 성장하는 모습을 보인다. 신자도는 서쪽에 있는 조수로 방향으로 지속적으로 성장하는 것으로 보인다. 도요등은 1996년 분리된 형태에서 완전히 연결되어 하나의 울타리 섬으로 성장하면서 그 위치가 북쪽으로 이동(육지 쪽으로 후퇴)하였음을 보여준다. 이러한 도요등의 발달과는 달리 백합등과 나무싯등의 지형은 1996년 이후 크게 변하지 않은 것으로 나타난다.

3. 해안선 변화율

3.1 수치해안선분석시스템

해안선 변화율은 해안선 구축 자료의 시간 규모 및 품질, 횡단측정선의 간격, 산정 방법 등 매우 다양한 요인에 의하여 지배된다. Genz et al.(2007)은 여러 가지 해안선 변화율 계산 방법을 비교한 연구에서 해안선 자료구축에 따른 정확도와 폭풍의 영향을 받은 해안선 자료의 선택 여부에 따라 해안선 변화율 산정 방법을 결정하여야 한다고 권고한다. 본 연구에서는 Thieler et al.(2005)이 개발한 수치해안선분석시스템을 적용하여 진우도, 신자도 및 도요등에 대한 장기간의 해안선 변화율을 산정하였다. 수치해안

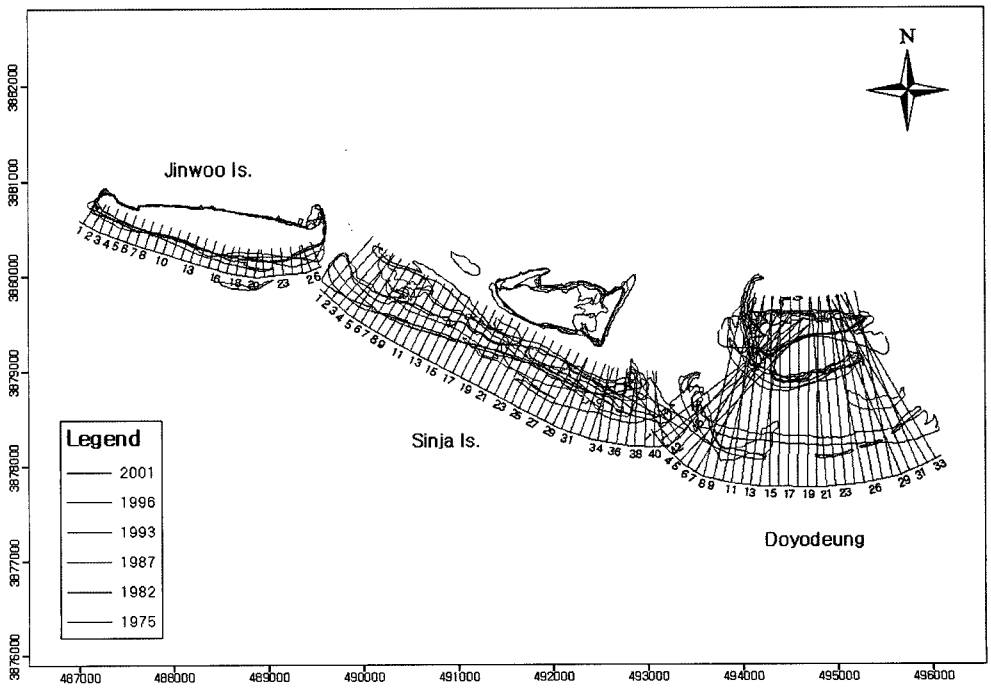

Fig. 10. Map showing historical shorelines and DSAS-generated baselines and transect for each barrier island. Transect numbers for each barrier island start from left.

선분석시스템은 해안선 변화율과 이에 대한 통계자료를 산출하는 프로그램이며 ESRI ArcGIS 소프트웨어의 확장 도구로서 구동된다. Fig. 10에 도시된 바와 같이 이 프로그램은 해안선 변화율 측정을 위한 기준선(baseline)을 설정하고, 기준선에 수직인 횡단측정선(transect)을 자동으로 생성한다. 본 연구에서는 울타리 섬의 바다 쪽(남측)에 해안선과 비슷한 형태의 기준선을 배치하였으며 횡단측정선의 간격은 100 m로 설정하였다.

진우도와 신자도는 1975년부터 존재가 확인되었다. 반면 도요등은 1993년 항공사진부터 그 모습이 나타났기 때문에 도요등에 대한 해안선 변화 분석은 1993년부터 시작될 필요가 있다. 그러나 낙동강 하구 전체를 대상으로 1975년 이후의 해안선 변화를 살펴볼 경우에는 도요등 출현 이전의 해안선으로서 백합등을 고려하는 것이 타당하다고 생각한다. 따라서 본 연구에서 도요등의 해안선 변화율은 도요등 자체의 변화에 의한 것이 아니며 백합등과 나무싯등의 해안선을 도요등의 과거 해안선으로 간주하여 분석한 것이다. 그리고 Fig. 9에서 1996년 도요등의 해안선으로 도화한 longshore bar는 해안선변화율 계산에서 제외하였다.

수치해안선분석시스템은 EPR(end point rate), AOR (average of rates), JKR(jackknife rate), LRR(linear regression rate) 및 WLR(weighted linear regression rate) 등 5 종류의 해안선 변화율을 산정하며 신뢰도를 지시하는 통계자료가 추가로 제공된다(Thieler et al., 2005). 본 연구에서는 EPR, JKR 및 LRR 등 3 종류의 해안선 변화율을 제시한다. EPR은 가장 오래된 해안선과 최근의 해안선 사이의 이동거리를 경과 시간으로 나눈 값으로서 계산 방법이 가장 단순하기 때문에 널리 사용되고 있다(Dolan et al., 1991). JKR은 선형 회귀(linear regression)의 반복법으로서 각각의 반복에서 해안선의 위치 자료 중 어느 한 점을 누락하며, 이러한 모든 자료 조합에 의한 선형 회귀식으로부터 구한 기울기를 평균하여 JKR을 계산한다. 이런 방법으로서 과대오차를 포함한 소수의 자료가 선형 회귀식에 미치는 영향을 저감시킬 수 있다. LRR은 전체 해안선 자료를 이용하는 선형 회귀식으로 계산된다. 이 방법에서 R^2 값은 선형 회귀식이 자료의 분산을 어느 정도로 평가하는지에 대한 척도로서 사용될 수 있다. 즉, 시간과 해안선 위치 사이의 상관관계가 선형으로 설명될 수 있는지를 반영한다. EPR, JKR, LRR 모두 장기간의 해안선 변화에는 선형의 상관관계가 있다는 것을 전제한다(Genz et al., 2007). Dolan et al.(1991)은 해안선이 시간에 따라 일정한 속도로 변하는 연안에서는 선형 모델의 결과가 동일하지만, 해안선 변화 속도가 일정하지 않은 연안에서는 선형 모델 간에 다양한 차이가 발생한다고 보고하였다.

3.2 울타리 섬의 해안선 변화율

진우도, 신자도, 도요등에 대한 3 종류의 해안선 변화율과 선형 회귀식의 R^2 값을 Fig. 11에 도시하였다. 각각의 울타리 섬에서 계산된 해안선 변화율과 R^2 값에 대한 최대, 최소 및 평균값을 Table 3에 정리하였다. 본 연구에서

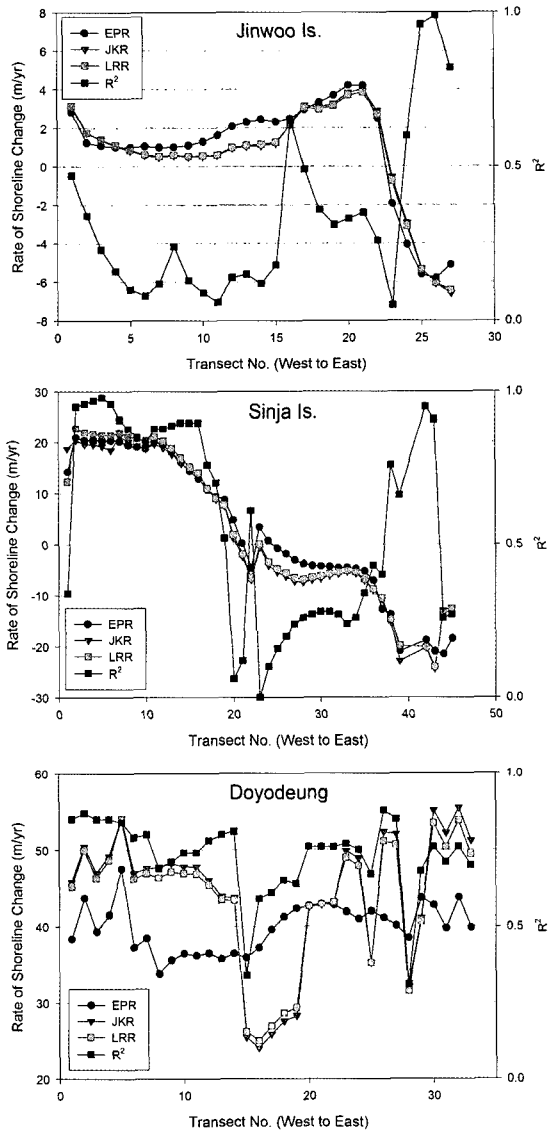

Fig. 11. Rate of shoreline changes and R^2 values of LRR for each transect. Transect number starts from 1 at each barrier island and increases to the east.

해안선 변화율의 양의 값은 해안선이 바다 쪽으로 전진한 것이며, 음의 값은 해안선이 육지 쪽으로 후퇴한 것을 의미한다.

진우도에서 EPR, JKR, LRR의 공간적인 변동은 모두 유사한 양상을 보인다. 해안선 변화율은 횡단측정선 1부터 22까지 양의 값을 보이고 있으나, 23부터 27까지는 음의 값을 보인다(Fig. 11). 양의 해안선 변화율은 최대 4.2 m/yr, 음의 해안선 변화율은 최소 -6.6 m/yr에 달한다. 전체 해안선 변화율의 평균을 보면, EPR은 0.9 m/yr이고 JKR과 LRR은 0.6 m/yr로서 모두 양의 값을 나타내고 있으며 (Table 3), 이는 25년간 23 m 또는 15 m 정도의 해안선 변화를 나타낸다. R^2 값은 진우도 동측의 일부 지역에서 매우 높은 수준을 보이고 있으나 대부분의 지역에서는 낮은 수준을 보여준다. 이는 진우도의 동쪽 끝 지점에서의 해안선은 시간에 따라 일정한 간격으로 변화하였으나, 나머지 지역에서는 그 경향성이 미약하다는 것을 의미한다.

신자도에서 EPR, JKR, LRR의 공간적인 변동 양상은 진우도의 경우와 마찬가지로 모두 유사하다. 신자도의 해안선 변화율은 횡단측정선 20에서 25사이에 해당하는 지역을 중심으로 대칭적인 분포를 나타내고 있다(Fig. 11). 양의 해안선 변화율은 최대 22.9 m/yr, 음의 해안선 변화율은 최소 -24.5 m/yr에 달하며, 이러한 해안선 변화율의 극대값은 신자도의 양쪽 끝에서 나타난다. 이에 반하여 울타리 섬 전체의 평균값은 2.6~3.6 m/yr 범위에 그치고 있다 (Table 3). 한편, 신자도에서 R^2 값은 해안선 변화율의 크기와 비례하는 경향을 보인다. 즉 신자도 양쪽 끝 부분에서 해안선 변화는 선형의 상관관계가 높았음을 지시한다. 이러한 사실을 종합해 보면 신자도의 양쪽 끝 부분은 비교적 일정한 속도를 유지하면서 서쪽 끝부분은 바다 쪽으로 전진한 반면, 동쪽 끝 부분은 육지 쪽으로 후퇴하였음을 알 수 있다. 이는 신자도가 반시계 방향으로 회전하는 지형변화의 결과로서 해석된다.

Table 3. Statistics of rate of shoreline changes and R^2 values of LRR. Unit of EPR, JKR and LRR is m/yr.

Statistics \ Barrier Islands		Jinwoo Is.	Sinja Is.	Doyodeung
EPR	Max	4.2	21.0	47.5
	Min	-5.8	-21.6	33.8
	Mean	0.9	3.6	39.9
JKR	Max	4.0	21.2	55.5
	Min	-6.6	-24.5	24.0
	Mean	0.6	2.6	44.0
LRR	Max	3.8	22.9	53.9
	Min	-6.4	-24.1	25.0
	Mean	0.6	3.2	43.5
R^2	Max	0.99	0.98	0.88
	Min	0.05	0.00	0.31
	Mean	0.33	0.56	0.73

도요등의 경우 전체 횡단측정선에서 해안선 변화율은 양의 값을 보이며, JKR과 LRR의 공간적인 변동 양상은 서로 유사한 반면 EPR과는 큰 차이를 보인다(Fig. 11). 특히 횡단측정선 15~19에서 JKR과 LRR이 EPR보다 작은 값을 보이는데 이러한 횡단측정선은 Fig. 10에 도시된 바와 같이 1996년도 도요등의 해안선과 교차하지 않는다. 이에 반하여 1996년도 도요등의 해안선과 교차하는 횡단측

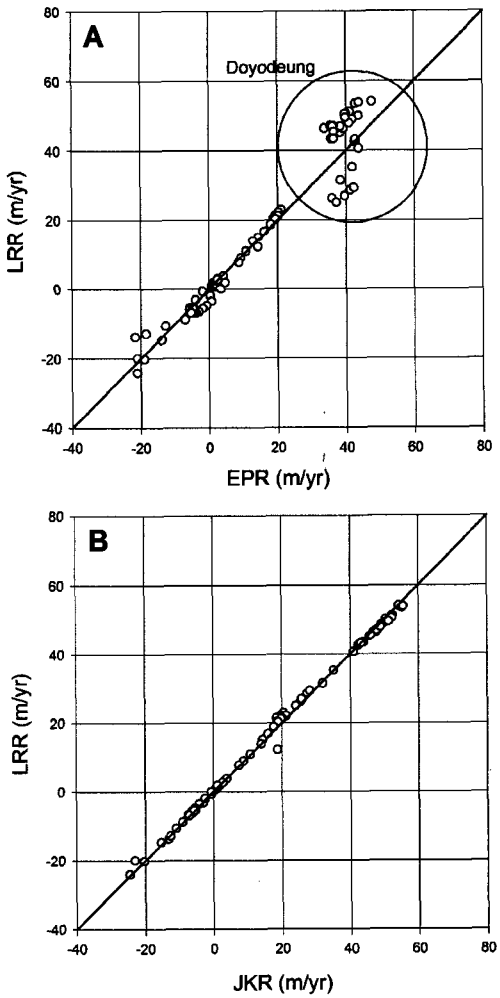

Fig. 12. Comparison of rate of shoreline changes computed by various methods for each transect; (A) LRR versus EPR and (B) LRR versus JKR. The diagonal line indicates equality between the two methods.

정선에서는 JKR과 LRR이 EPR보다 큰 값을 보인다. 따라서 JKR과 LRR의 변동 범위(24~56 m/yr)는 EPR의 변동 범위(34~48 m/yr)보다 크게 나타난다. 한편 JKR와 LRR의 평균은 44 m/yr로서 EPR의 평균 40 m/yr보다 약간 큰 값을 보인다(Table 3). 이는 1993년도와 1996년도에 도요등의 해안선은 2001년도 해안선 보다 남측(바다 쪽)으로 위치하였고, 이러한 해안선 위치 자료는 JKR과 LRR의 산정에 큰 영향을 주지만, EPR의 산정에서는 고려되지 않기 때문이다. 더구나 2001년도에 도요등의 해안선은 연속적인 반면 그 이전에는 소규모로 산재한 울타리 섬으로서 해안선이 불연속적인 것도 선형 모델의 변동성을 증가시킨다. R^2 값은 0.31~0.88의 범위를 보이며, 평균은 전체 울타리 섬 중 가장 높은 값을 보인다. 따라서 도요등은 다른 울타리 섬에 비하여 해안선 전체에서 선형의 상관관계가 양호하다.

울타리 섬에 대하여 다양한 방법으로 산정한 해안선 변화율을 상호 비교한 결과를 Fig. 12에 도시하였다. LRR은 JKR과 매우 밀접한 관계를 보이고 있으며(Fig. 12B), 이는 Dolan et al.(1991)이 제시한 결과와 동일하다. 한편, LRR(또는 JKR)은 도요등을 제외하고는 EPR과 비교적 밀접한 관계가 있다(Fig. 12A). Dolan et al.(1991)은 EPR이 LRR에 비하여 일반적으로 과대평가(overestimate) 한다고 보고하였으나, 본 연구지역에서는 이러한 경향이 나타나지 않았다. 도요등의 경우 LRR과 EPR의 차이는 변동성이 매우 큰 LRR에 기인한다. 이러한 변동성은 1993년도 이전에 새롭게 출현한 도요등이 성장하는 과정에서 나타난 불연속적인 해안선과 관련된다.

4. 토 의

낙동강 하구지역 울타리 섬에 대한 장기간 해안선 변화율은 울타리 섬들 사이뿐만 아니라 울타리 섬 내에서도 뚜렷한 차이가 있다. Fig. 13에 도시한 바와 같이 해안선 변화율은 서측(진우도)에서 동측(도요등)으로 증가하는 경향을 보인다. 해안선 변화의 방향은 진우도와 신자도의 경우 울타리 섬의 서측과 동측에서 각기 다른 반면, 도요등의 경우 전체적으로 같은 방향이다. 특히 신자도는 해안선 변화의 크기와 방향이 대칭적인 특징을 나타낸다. 이러한 해안선 변화의 공간적인 변동 특성과 달리 유 등(2006)은 1:50,000 해도를 이용한 분석에서 단지 3개의 측선을 이용하여 해안선 변화율을 산정하였으며, 이 결과 모든 해안선은 바다 쪽으로 전진한다고 하였다.

해안선 변화의 정량적인 분석을 위해서 해도 또는 지형도를 사용하는 것은 문제가 있다. 해도에 표시된 해안

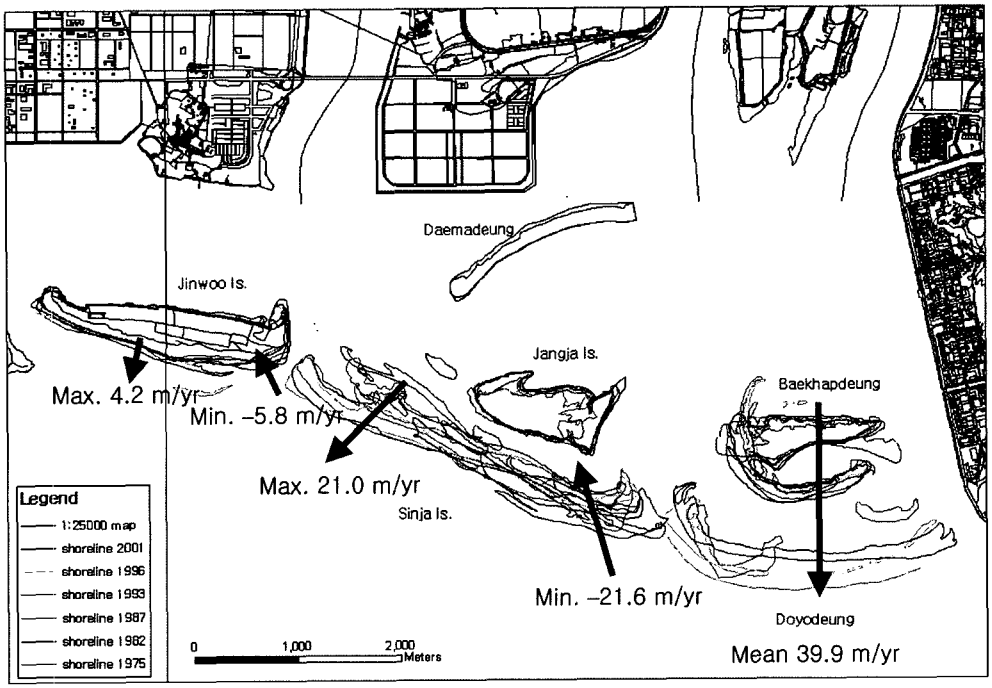

Fig. 13. Schematic diagram showing rate of shoreline changes (EPR) for each barrier island.

선은 실제 발행년도의 해안선과 다를 뿐만 아니라 해안선의 측정 시기에 관한 정보도 없기 때문이다. Fig. 3~8에 도시된 년도별 항공사진과 유 등(2006)의 Fig. 4에 도시된 해도를 비교해 보면, 해도에서의 울타리 섬 지형은 항공사진에 비하여 매우 단순하게 묘사되어 있으며 더욱이 일부 울타리 섬은 약 10년 동안 비슷한 형태를 유지하고 있다. 일례로서 1995년도 발행 해도와 1996년도의 항공사진을 비교하면 울타리 섬 지형에 대한 차이를 뚜렷하게 인식할 수 있다.

울타리 섬 해안선 변화율의 선형적인 상관관계(R^2 값)은 공간적인 변동을 보인다. 진우도 동측과 신자도 양측은 울타리 섬 내에서 해안선 변화율과 R^2 값이 동시에 높은 반면 이외의 지역에서는 동시에 낮다(Fig. 11). 그런데 Fig. 12에서 진우도와 신자도에 대한 3 종류의 해안선 변화율은 서로 밀접한 관계를 보이고 있다. 이는 Dolan et al.(1991)에 의하면 진우도와 신자도의 해안선 변화율은 선형 모델로서 설명될 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 상반된 결과를 보이는 이유로는 실질적인 해안선 변화가 작을수록 단기간의 해안선 변동, 해안선 위치에 대한 불확실성 등으로 인한 오차가 해안선 변화 자료에 미치는 영향이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 R^2 값만으로 진우도와 신자도의 일부 지역에는 비선형적 상관관계가 존재한다고 판단하기에는 성급한 것 같다.

도요등의 경우 전체적으로 R^2 값은 높은 수준이지만 해안선 변화율 간의 관계성은 낮기 때문에 다른 울타리 섬과는 정반대의 상반 관계를 보인다. 사실 도요등의 해안선 변화에는 비선형적 요소가 매우 크다. 첫째, 1993년 이전의 도요등 해안선으로서 백합등 해안선을 이용하였다. 둘째, 도요등은 1993년도에 소규모로 산재한 형태에서 성장하여 2001년도에는 북쪽으로 이동하였기 때문에 1993년 이후 도요등의 해안선 변화는 오히려 육지쪽으로 후퇴한 결과를 보였다. 따라서 도요등에는 비선형 모델이 적합할 것으로 판단되며 이를 위해서는 장기적인 자료의 구축이 요구된다.

낙동강 하구 연안역에서 약 80년에 걸쳐 이루어진 연안개발은 울타리 섬 지형 변화의 중요한 요인 중 하나임에 틀림없다. 연안개발에 의하여 낙동강 유출수에 변동이 발생하였으며 울타리 섬 배후습지의 면적이 감소하였다. 김(2006)은 1987년에 완공된 하구둑 건설과 관련하여 퇴적물의 공급량 변화가 울타리 섬의 지형 변화를 주도한다고 보았다. 마찬가지로 전체적인 해안선 변화율이 서측에서 동측으로 크게 증가하는 경향은 1930년대에 건설된 낙동수문으로 인하여 서낙동강이 폐쇄되고 하천수가 주로 동낙동강으로 유출된 결과와 연관될 수 있다. 그런데 1993년 이후 도요등의 지형변화를 고려하면, 향후 과거와 같은 규모로 해안선이 변화(전진)할 것인지 의문시 된다. 하구둑 건설과 더불어 낙동강 본류에서 홍수 조절을 위한 하천수로 유지 준설이 현재까지 이루어져 왔으며, 이러한 인위적인 퇴적물 공급의 감소로 인하여 아마도 도요등은 육지 쪽으로 후퇴한 것인지 모른다. 만일 낙동강 유출수의 변동에 의한 영향이 그동안 변화된 지형과 평형상태에 근접하였다고 가정한다면, 1990년대 중반에 급격하게 이루어진 연안매립은 향후 지형 변화를 주도할 가능성이 높다. 이러한 지형변화를 모니터링하기 위해서는 앞으로도 장기간의 지형변화 자료의 구축이 요구된다.

5. 결 론

1. 본 연구에서 항공사진에 의한 해안선 자료와 수치해안선분석시스템을 이용하여 낙동강 하구 울타리 섬의 장기간 해안선 변화율을 산정하였으며, 해안선 변화율은 공간적으로 다양하게 변동하는 특성을 보여주었다. 이는 해도 또는 지형도를 이용하여 산정할 수 있는 해안선 변화에 비하여 더욱 정밀하고 정확한 결과라 할 수 있다.

2. 장기간 해안선 변화율은 신뢰도를 파악할 수 있는 통계 자료와 더불어 여러 가지 방법으로 산정한 결과들을 비교 분석할 필요가 있다. 진우도와 신자도의 해안선 변화는 본 연구에서 사용한 선형 모델로서 설명된다고 판단된다. 그러나 도요등의 해안선 변화는 비선형 모델이 적합한 것으로 판단되며, 이를 위해서는 장기적인 해안선 자료가 추가로 보완될 필요가 있다.

3. 본 연구에서는 경제적이면서 편리한 방법으로 항공사진 분석, 해안선 자료 구축 및 해안선 변화의 정량적인 분석을 수행하였다. 보다 정밀한 분석 방법을 사용한다면 해안선 변화가 작은 지역에서의 해안선 변화율에 대한 신뢰도가 향상될 것이다. 또한, 년도별 해안선 자료의 불확실성을 평가할 수 있으므로 이에 근거한 해안선변화율 분석 방법이 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 해양한국발전프로그램(Korea Sea Grant Program) 연구개발사업(산업공단화 조성에 따른 낙동강 하구의 연안지형변화 및 예측기술)의 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

김백운, 김부근, 이상룡 (2005). 낙동강 하구 해안선변화 연구를 위한 모자이크 항공사진의 구축. Ocean and Polar Research, 27(4), 497-507.

김상호, 신승호., 양상용, 이중우 (2003). 낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 6(3), 26-36.

김성환 (2005). 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주의 지형변화. 대한지리학회지, 40(4), 416-427.

유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006). 해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화. 한국해양공학회지, 20(6), 54-60.

장성태, 김기철 (2006). 낙동강 하구에서의 해양 환경 변화. 한국해양학회지 "바다", 11(1), 11-20.

Baily, B. and Nowell, D. (1996). Techniques for monitoring coastal change: a review and case study. Ocean & Coastal Management, 32(2), 85-95.

Dolan, R., Fenster, M. S. and Holme, S. J. (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of Coastal Research, 7(3), 723-744.

Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N. and Rooney, J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research, 23(1), 87-105.

Hapke, C. and Richmond, B. (2000). Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry. Environmental Geosciences, 7(1), 32-37.

Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. Journal of Coastal Research, 16(1), 111-124.

Morton, R. A., Miller, T. L. and Moore, L. J. (2004). National assessment of shoreline change: Part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of Mexico. US Geological Survey Open File Report 2004-1043.

Morton, R. A. and Speed, F. M. (1998). Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. Journal of Coastal Research, 14(4), 1373-1384.

Ruggiero, P., Kamminsky, G. M. and Gelfenbaum, G. (2003). Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high-energy coastlines: Implications for shoreline change analyses. Journal of Coastal Research, SI 38, 57-82.

Thieler, E. R., Danforth, W. W. (1994). Historical shoreline mapping (II): Application of the Digital Shoreline Mapping and Analysis Systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. Journal of Coastal Research, 10(3), 600-620.

Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A. and Miller, T. L. (2005). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0; An ArcGIS© extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

Received July 6, 2007
Accepted August 11, 2007