

하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주의 지형변화

김성환*

The Morphological Changes of Deltaic Barrier Islands in the Nakdong River Estuary after the Construction of River Barrage

Sung Hwan Kim*

요약 : 이 연구는 낙동강 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역의 삼각주 연안사주에서 나타나는 지형변화 양상을 살펴보았다. 이를 위하여 항공사진 측량기법을 이용하여 1987년, 1996년, 2001년의 해안선을 추출하고 연안사주의 형태변화 분석을 실시하였다. 연안사주의 형태변화 분석에는 해안선의 변화와 연안사주의 면적변화, 그리고 기하학적 중심인 도심의 이동방향을 살펴보았다. 낙동강 삼각주 연안사주의 형태변화 분석에서 하구둑 건설 이후 새로이 출현한 도요등의 면적 증가가 두드러졌고, 이로 인하여 배후에 위치하는 백합등의 면적 감소와 쇠퇴로 이어졌다. 신자도의 경우에는 하구둑 건설 이후에도 지속적으로 면적이 증가하는 결과가 나타났다. 진우도와 대마등, 장자도의 경우에는 면적변화와 도심의 이동이 거의 나타나지 않았다. 이러한 낙동강 하구역의 삼각주 연안사주 지형변화는 성장/정체/쇠퇴 양상으로 나누어 분석할 수 있다. 현재 하천수의 유출이 이루어지고 있는 낙동강 본류의 하구를 중심으로 해안선을 형성하고 있는 연안사주에서는 성장 양상이 나타난다. 도요등과 신자도의 경우 해양 프로세스에 의해 지속적으로 퇴적물 공급이 이루어져 성장양상을 보인다. 외해 쪽으로 새로운 연안사주가 출현하기 이전까지 해안선을 구성하고 있던 연안사주는 쇠퇴 양상을 보이고 있다. 백합등은 하구둑이 건설된 이후 도요등이 출현함에 따라 현재는 연안사주의 전면부가 파괴되어 사라지는 쇠퇴 양상을 보이고 있다. 백합등의 쇠퇴 양상은 도요등 배후 지역으로 음의 퇴적물을 수지가 형성되고 있음을 시시한다. 연안사주 가운데 출현 시기가 가장 이른 진우도와 대마등, 장자도의 경우는 뚜렷한 성장이나 쇠퇴가 나타나지 않는 정체 양상을 나타내고 있다.

주요어 : 삼각주 연안사주, 항공사진 측량기법, 기하학적 도심, 지형변화 양상, 하구둑 건설

Abstract : This paper aims to investigate morphological changes of deltaic barrier islands in the Nakdong Estuary and especially their spatial variations after barrage construction. We analyzed shorelines, geometrical centroids, and areas to reveal the changes of barrier islands. Here, we suggest three interesting points from this study. First, each individual barrier island in the Nakdong estuary goes through a different stage of the geomorphic cycle. The frontal barrier islands such as Sinja-do and Doyo-deung grow because they are located in front of the gates of the barrage. Sediments in water out of the gates are moved to offshore and then reworked by coastal processes such as waves and tides. Second, on the contrary, Baekhap-deung located behind Doyo-deung now diminishes indicating that sediments mainly move to the frontal growing island. Third, there is no morphological change in several barrier islands far away from the main flow of the Nakdong river such as Jinwoo-do, Daema-deung, and Jangja-do. In conclusion, barrier islands in the Nakdong estuary show distinct spatial variations. As a barrier island is closer to the main channel or is in the frontal location, there happens a very dynamic change in the morphology of the island.

Key Words : deltaic barrier island, aerial photograph, geometrical centroid, morphological change, river barrage

* 서울대학교 국토문제연구소 선임연구원(Research Fellow, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University)
phygeokim@chol.com

1. 서론

1) 연구배경

낙동강 하류지역은 낮은 하상경사라는 지형적인 특성으로 인해 대조시 만조위 때에는 염수의 유입으로 비롯되는 피해를 겪었다. 이러한 문제를 해결하고 새로운 교통로와 매립에 의한 생활권 확보라는 목적으로 낙동강 하구둑 공사가 계획되었고 1987년 공사가 마무리되어 현재에 이르고 있다(한국수자원공사, 1988). 낙동강 하구둑의 건설은 건설의 목적으로 제시된 사항과 하구둑 건설로 예상되는 환경변화와 이에 따른 자연생태적 가치 훼손에 대한 우려의 심각한 갈등 속에서 진행되었다(반용부, 1995).

1987년 완공된 낙동강 하구둑은 이러한 낙동강 하류지역에 미기후, 수문, 지형, 생태 등 자연환경 측면의 변화와 인구, 산업, 공공시설, 교통 등 사회경제적 측면의 변화를 가져왔다(부산지방환경청, 1992; 부산발전연구원, 2005b). 하구둑의 건설이 낙동강 하류지역에 미친 영향이 복합적인 만큼 이에 대한 다양한 측면의 연구가 필요하다. 이러한 배경에서 자연환경 변화를 중심으로 다양한 연구들이 진행되었으며, 이러한 연구 중 지형변화에 관한 연구는 낙동강 하류지역을 구성하는 삼각주 연안사주와 주변 환경이 인간 활동과 생태계의 주요한 터전이 된다는 점에서 중요하다(부산지방환경청, 1992; 서울대학교 기초과학연구원, 1998).

낙동강 하구둑이 건설된 이후 예상되는 다양한 환경변화 중에서 지형변화와 관련한 주요 관심은 삼각주 전면 연안사주의 지형변화이다. 하구둑 건설이 낙동강 상류로부터의 퇴적물 운반과 하구로의 유출에 변화를 가져오고 이것이 낙동강 하구 일대의 퇴적환경에 영향을 미치게 된다는 점에서 연안사주 지형의 변화는 필연적인 것으로 여겨졌고(오건환, 1988), 하구둑 건설 이후 낙동강 삼각주는 낙동강에 의한 퇴적물의 공급이 거의 줄어들어 성장이 둔화되고 파랑에 의한 해양영력이 지형형성에 주도적인 역할을 하게 된다고 예상되었다(서울대학교 기초과학원, 1998).

하구둑의 건설 이후 삼각주 연안사주에 대한 연구는

새로운 퇴적지형의 등장으로 퇴적환경과 하류지역의 해안환경에 나타나는 급속한 변화를 밝히고 있다(오건환, 1999; 반용부, 2004b, 2005b). 반용부(2004b, 2005b)는 하구둑 건설 이후 새로운 연안사주 지형이 형성되고 성장하는 과정에서 나타나는 낙동강 하구의 변화에 대한 연구를 지형변화의 측면과 퇴적물 분석 측면으로 진행하였다. 이를 통해 연안사주 지형변화의 측면에서 하구둑이 건설된 이후에도 지속적으로 연안사주 지형이 형성된다고 보았다. 또한 이러한 연안사주 지형형성은 퇴적물의 입도분석 결과 해양영력의 기작이 주로 작용하며 파랑이 주도적인 역할을 하고 있다고 분석하였다. 오건환(1999)은 낙동강 하구둑 건설 이후 나타나는 연안사주 지형의 급속한 형성과 해안 방향으로의 전진 발달을 조사하였다. 이 연구에서는 낙동강 하구역에서 나타나고 있는 변화를 연안사주 지형의 형성과 삼각주 전면의 성장으로 요약하고 있다. 또한 이러한 미지형의 변화가 낙동강에서 유출되는 하천수의 하천영력과 파랑과 조류 등의 해양영력이 새로운 평형을 이루는 시기까지 진행될 것으로 예상하고 있다. 이러한 연구는 하구둑의 건설이 퇴적물 공급원에 미치는 영향으로 나타나는 변화에 따라 새로운 연안사주가 출현하고 삼각주 전면이 활발하게 성장하는 것을 입증하고 있다.

연안사주 지형변화는 연안사주의 다양한 기능과 가치에 직접적인 영향을 미치게 되고 이러한 영향은 나아가 연안사주가 위치하는 해안지역 전체의 다양한 환경문제로 확대된다. 삼각주 연안사주의 경우 새로운 퇴적환경의 지시자가 된다는 점을 고려할 때, 하구둑의 건설과 관련하여 낙동강 하류지역에서 연안사주 지형변화를 밝히는 작업이 필요하다고 하겠다.

2) 연구목적

이 연구에서는 하구둑 건설이라는 인위적인 환경변화로 다양한 인문·자연환경 변화가 나타나고 있는 낙동강 하류지역을 대상으로 하여 인간의 간섭으로 인한 연안사주의 시계열적 지형의 변화 양상을 살펴보고자 한다. 하구둑의 건설은 인위적인 환경변화를 초래하는 극단적인 예로 이와 관련한 해안 지형의 변화는 지형

학적 해석과 더불어 해안환경의 효율적인 관리를 위해 반드시 선행되어야 하는 연구주제이다.

낙동강 하구역의 환경변화에 대하여 제기된 여러 가지 의문 가운데, 지형변화의 측면에서는 “퇴적과정이 진행될 것인가? 중단될 것인가?”에 대한 질문과 이에 대한 여러 가지 예측이 있어 왔다. 지금까지 진행된 낙동강 하구역의 지형변화에 관한 연구는 이러한 질문에 대해 퇴적과정의 연속성으로 답을 주고 있다. 기존의 연구 결과를 통해 하구둑이 건설된 이후, 퇴적과정이 계속되어 새로운 지형이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

그렇다면 이러한 하구역의 변화에 대해서 보다 효과적인 관리를 위해서는 퇴적과정이 나타나는 공간적인 양상과 차이에 대해서 분석할 필요가 있다. 보다 퇴적이 활발하게 진행되는 곳과 그렇지 않은 곳에 대한 분석이 이루어져야만 각 상황에 맞는 적절한 관리대책을 수립 할 수 있을 것이다. 특히 생태적으로 중요한 서식처를 제공하는 낙동강 하구역의 경우 지형의 쇠퇴는 곧 서식처의 파괴로 이어지기 때문에 중요한 의미를 갖는다.

이를 위하여 연구목적을 보다 구체적으로 제시하면

다음과 같다.

첫째, 지형변화의 공간적 양상을 파악하기 위해서는 무엇보다도 정확하게 미지형 요소를 파악할 필요가 있다. 이를 위해서 정확한 해안선 추출이 선행되어야 한다. 따라서 연구지역을 대상으로 촬영한 항공사진을 이용하여 항공사진 측량기법을 이용하여 정확한 해안선을 추출하고 시기별 해안선 변화를 분석하고자 한다.

둘째, 이를 바탕으로 삼각주 연안사주 지형변화 양상을 지시하는 지표가 되는 요소를 정량적으로 분석할 필요가 있다. 이 과정에는 각 시기별 삼각주 연안사주의 면적과 도심(圖心, centroid)을 산출하여 분석을 실시하였다. 하구둑이 건설된 이후 각 연안사주 면적의 변화량과 변화율, 그리고 각 연안사주 퇴적체의 기하학적 중심인 도심의 이동량과 이동방향을 통해 지형변화의 공간적 양상을 제시하고자 한다.

마지막으로 이상의 분석결과를 종합하여 현재 낙동강 하구역의 삼각주 연안사주의 지형변화 양상을 구분하여 설명하고자 한다. 연안사주 지형변화 양상은 지속적인 성장양상, 퇴적체의 감소에 따른 쇠퇴양상, 그

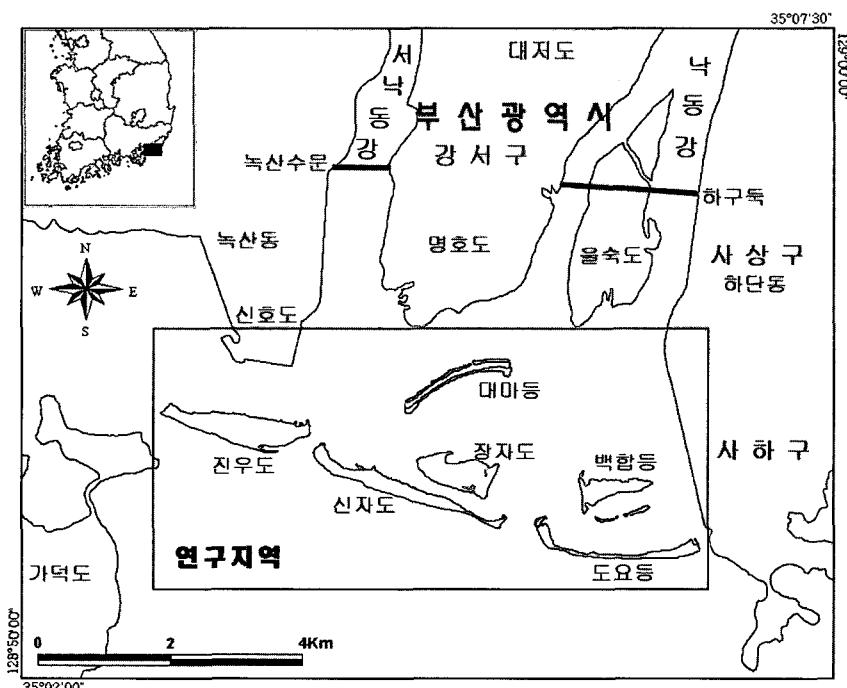


그림 1. 낙동강 하류와 삼각주 연안사주

리고 뚜렷한 변화를 보이지 않는 정체양상으로 구분하여 설명할 수 있을 것이다.

이 연구는 낙동강 하구역에서 진행되고 있는 지형변화의 측면에서 보다 자세한 정보를 제공한다. 즉, 하구둑이 건설된 이후 제기된 지형형성의 계속여부에 대하여 전체적으로 퇴적지형의 형성이 지속적으로 진행되어 하구역 전면이 성장하고 있다는 기존의 연구 성과에서 나아가 퇴적과정이 활성화되는 지역과 그렇지 못한 지역의 차이를 지형변화의 공간적 변이로서 밝히게 된다. 이러한 과정을 통해 이 연구는 낙동강 하구역을 효과적으로 관리하기 위한 차별화되고 적절한 관리대책을 수립하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

2. 연구지역

낙동강 하류지역은 하상구배가 1/10,000 정도로 매우 완만하고, 운반되는 퇴적물의 양이 풍부하며, 남해로 유입하는 과정에서 급격한 유속의 감소가 나타나 강 하구를 중심으로 퇴적지형이 형성되기에 적합한 조건을 이루고 있다. 이러한 환경에서 낙동강 삼각주가 형성되어 공간적으로 남북방향으로 약 30km, 동서방향으로 약 16km 정도 규모의 퇴적지형을 이루고 있다.

낙동강 삼각주는 거대한 평야지대를 형성하고 있는데, 여기에는 상부의 망류하계망 주변으로 형성된 하중도군(群)과 삼각주 전면의 해안에 형성된 삼각주 연안사주군, 그리고 이러한 충적지형 주변의 배후습지로 구성된다. 낙동강 삼각주의 하중도군은 대체로 남북방향으로 길게 늘어진 형태를 보이며, 대저도, 대사도, 맥도, 순아도, 둔치도, 일옹도, 읊숙도 등이 대표적이다. 이 연구의 대상이 되는 삼각주 연안사주군¹⁾은 낙동강 하구의 서쪽으로부터 진우도, 대마등, 장자도, 신자도(새등), 백합등(나무식등 포함), 도요등(철새등) 등이 대표적이며 비교적 안정적인 형태를 보이는 하중도군과는 달리 낙동강 하류의 유로변경과 퇴적환경 변화에 따라 지형변화가 비교적 빠르게 나타나고 있는 것이 특징이다.

낙동강이 남해로 유입하는 말단지역은 낙동강 삼각주 전면을 구성하는 연안사주로 해안선이 형성되어 있

다. 낙동강 하구역의 연안사주와 배후의 간석지로 이루어진 해안습지는 높은 생산성을 보이는 지역이다. 담수 기원의 유기물과 해수 기원의 영양 염류가 만나는 이곳은 어족이 풍부하여 어획량이 높고 해조류의 양식도 성행한다(부산발전연구원, 2005a). 천연기념물 제179호로 지정되고 람사협약에 의해 보전지구로 지정된 읍숙도를 중심으로 하는 일대의 해안습지는 철새도래지로서 야생동식물의 주요 서식지와 이동경로를 제공하는 생태적 가치가 높은 곳이기도 하다(서울대학교 기초과학연구원, 1998).

3. 항공사진 측량기법에 의한 지형변화의 측정과 분석과정

연구지역인 삼각주 연안사주의 형태변화를 분석하기 위하여 국토지리정보원에서 촬영한 항공사진을 이용하였다. 항공사진은 낙동강 하구둑이 건설된 시기에 해당하는 1987년부터 1996년, 2001년²⁾까지 연구지역을 대상으로 촬영한 총 37장의 사진을 이용하였다.³⁾

1987년 이후 지형도에 반영되어 있지 않은 해안선 변화와 이를 통한 삼각주 연안사주 지형변화는 국토지리정보원의 최근 항공사진을 이용한 분석을 통해 확인 가능하였다.⁴⁾ 국토지리정보원에서 수행하는 항공사진 촬영은 지형도 제작을 주 목적으로 하기 때문에 사진측량 기법을 통해 정밀한 지형변화의 분석이 가능하였다.

연안사주 지형의 시계열적 변화를 분석하기 위하여 항공사진의 양화필름을 준비하고 해석도화기를 이용하여 입체도화를 실시하였다. 항공사진 양화필름에 대한 입체도화까지의 과정에는 항공사진의 내부표정, 연속된 항공사진 간의 상호표정, 실제 지형과의 일치를 위한 절대표정의 과정이 포함된다.

연구의 대상이 되는 연안사주 지형은 조차(潮差)에 따라 수면상으로 노출되는 형태가 달라진다. 따라서 연구지역에서 정확한 형태변화의 분석을 위해서는 조차와 관계없이 형태변화의 비교가 가능하도록 분석 대상이 되는 모든 항공사진에 일관된 수직 고도기준을 적용해야 한다. 이 연구에서는 수면상으로 노출된 지

형을 중심으로 분석하기 위하여 항공사진의 입체도화를 통해 해수준면을 기준으로 0m 고도에 해당하는 해안선을 추출하였다.

각 시기별로 추출한 해안선을 바탕으로하여 하구둑 건설 이후 연안사주의 평면적 변화와 연안사주의 중심에 해당하는 도심 이동방향을 파악하였다. 연안사주의 면적 계산은 항공사진으로부터 추출한 해안선을 바탕으로 ArcView 3.2a 프로그램을 이용하여 도시하고 각 연안사주 별로 면적계산을 수행하였다. 기하학적 중심인 도심의 계산⁵⁾ 역시 ArcView 3.2a 를 이용하여 수행하고 계산된 결과를 각 연안사주 별로 도시하였다.

4. 삼각주 연안사주 지형변화

1) 1987년의 삼각주 연안사주 해안선

1987년 낙동강 삼각주 연안사주의 해안선은 그림 2

에 나타난 것과 같다. 1987년의 해안선에는 현재의 도요등이 나타나지 않고 진우도, 대마등, 장자도, 백합 등, 신자도가 나타나 있다.

연안사주의 형태변화 측면에서 볼 때, 1987년의 해안선을 형성하고 있는 진우도와 신자도, 백합등 중에서 신자도의 출현과 백합등의 성장이 두드러진다. 낙동강 본류의 유로변경⁶⁾이 이루어진 1934년 이후 하천 수의 주 유출로가 되고 있는 동쪽의 낙동강 본류를 중심으로 퇴적지형의 형성이 두드러지는 결과로 사료된다.

백합등의 경우 1950년대에 최초로 출현하여 지속적인 퇴적과정의 활성화에 따라 바로 남쪽으로 형성된 나무식등과 연결되어 현재의 모양을 보이고 있다. 마찬가지로 현재의 낙동강 본류가 유입⁷⁾하는 방향인 하구역의 동쪽 지역으로는 장자도의 전면에 새로운 연안사주인 신자도가 형성되어 있다. 현재의 도요등이 위치하고 있는 백합등의 남쪽으로 몇 개의 소규모 퇴적지형이 속등⁸⁾의 형태로 나타나고 있다. 반면 진우도의 경우는 과거의 해안선과 거의 동일한 형태로 변화가 없음을 확인할 수 있다.

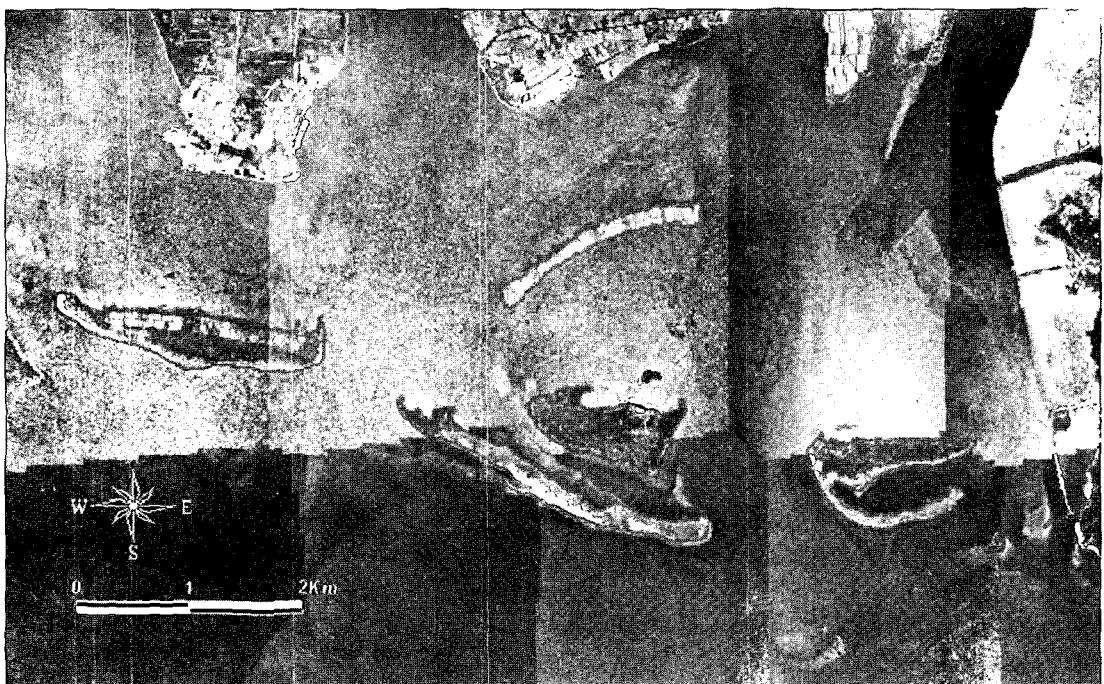


그림 2. 낙동강 삼각주 연안사주 해안선(1987년 항공사진에서 추출)

2) 1996년의 삼각주 연안사주 해안선

1996년 낙동강 삼각주 연안사주 해안선은 그림 3에 나타난 것과 같다. 1996년의 해안선에는 현재의 도요 등을 포함하여 현재 해안선을 형성하고 있는 연안사주 전체를 확인할 수 있다.

연안사주의 형태변화 측면에서 볼 때, 도요등이 백합등의 남쪽에서 출현하여 성장하게 되어 새롭게 진우도와 신자도, 도요등으로 이어지는 1996년의 해안선을 형성하는 것이 두드러진다. 현재 낙동강 본류인 동낙동강의 유로를 중심으로 진행되어 오던 퇴적과정이 하구둑의 건설 이후 퇴적물 공급의 감소로 인해 중단될 것이라는 예측이 있었으나, 새로운 연안사주인 도요등의 등장은 하구둑이 건설된 이후에도 지속적으로 퇴적이 진행되고 있다는 것을 시시하고 있다.

백합등의 경우 1950년대에 최초로 출현하여 퇴적과정이 활성화되는 것에 따라 바로 남쪽으로 형성된 나무식등과 연결되어 있었으나, 1996년의 해안선에서는 남쪽의 나무식등 부분이 상당히 파괴되어 분리된 형태를 나타내고 있다. 도요등은 1987년의 해안선 분석에

서 몇 개의 속등 형태로 분산되어 나타나 있었으나 1996년에는 동쪽과 서쪽으로 초승달 형태를 크게 나타내면서 중앙부가 분리된 형태를 나타내고 있다. 반면 진우도의 경우는 1987년의 해안선 분석과 마찬가지로 과거의 해안선과 거의 동일한 형태로 변화가 없음을 확인할 수 있다.

3) 2001년의 삼각주 연안사주 해안선

2001년 낙동강 삼각주 연안사주의 해안선은 그림 4에 나타난 것과 같다. 2001년의 해안선에는 현재 해안선을 형성하고 있는 연안사주인 진우도, 신자도, 도요등이 해안선을 구성하고 있다.

연안사주의 형태변화 측면에서 볼 때, 도요등이 지속적으로 성장하는 것이 두드러진다. 신자도 역시 연안사주의 서쪽과 동쪽으로 형성되어 있는 조수로를 향하여 지속적으로 성장하고 있는 것으로 나타난다. 도요등은 1987년의 해안선 분석에서 몇 개의 속등 형태로 분산되어 나타나 있었으나, 1996년에는 동쪽과 서쪽으로 초승달 형태를 크게 나타내면서 중앙부가 분리

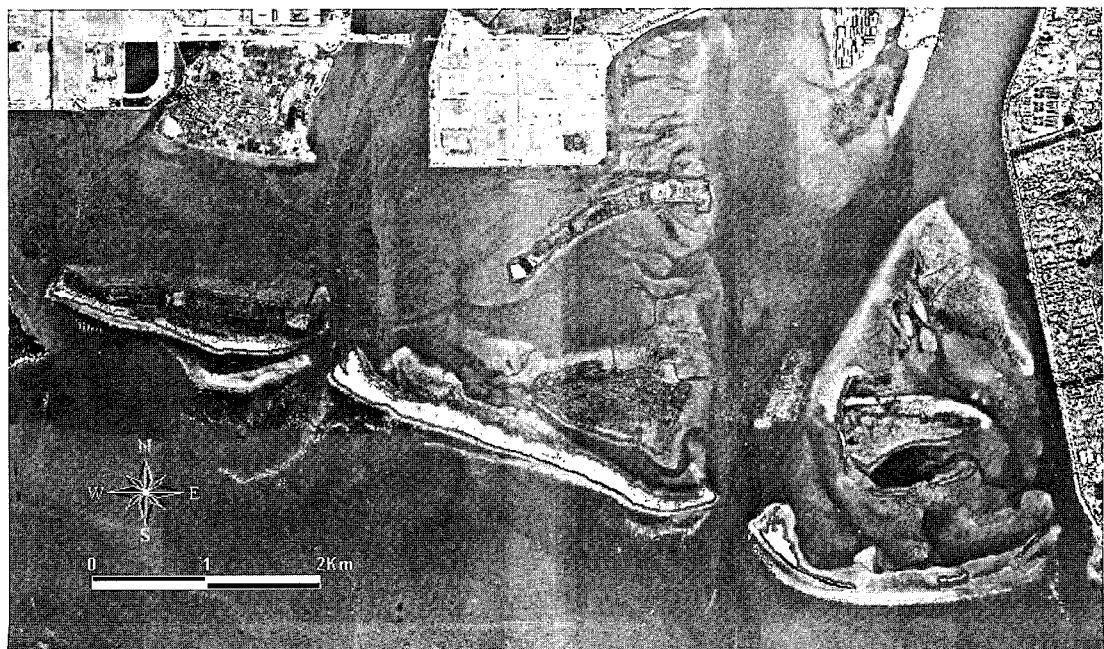


그림 3. 낙동강 삼각주 연안사주 해안선(1996년 항공사진에서 추출)

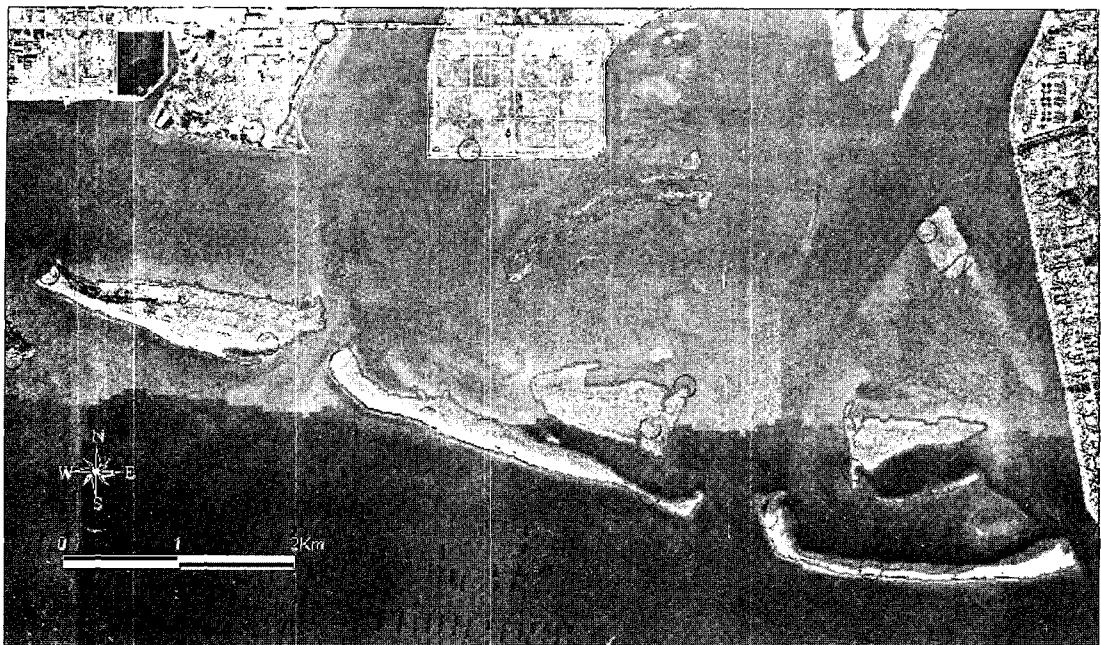


그림 4. 낙동강 삼각주 연안사주 해안선(2001년 항공사진에서 추출)

된 형태를 나타내고 있다. 2001년의 해안선에서 도요 등은 전 시기에 동쪽과 서쪽으로 분리된 형태가 완전히 연결되어 하나의 연안사주 형태로 변화하였다.

백합등의 경우 1996년의 해안선에서는 남쪽의 나무식등 부분이 상당이 파괴되어 분리된 형태로 나타나고 있는데, 더 이상의 연안사주 퇴적체의 파괴는 진행되지 않는 것으로 나타난다.

진우도의 경우는 1987년과 1996년의 해안선 분석과 비교할 때 전체적으로는 커다란 변화가 나타나지 않는다. 그러나 주목해야 할 부분은 진우도의 동쪽으로 형성된 조수로 방향으로 새로운 퇴적체가 사취의 형태로 성장하고 있는 것을 확인할 수 있다. 대마등은 철새 서식지 확보를 위해 진행된 모래의 채취 과정에서 섬 주변의 형태를 남겨둔 채 내부를 하나의 긴 수로 형태로 파헤쳐져 독특한 형태를 나타내고 있다.

5. 삼각주 연안사주의 면적변화와 도심의 이동

1) 삼각주 연안사주의 면적변화

항공사진으로부터 추출한 해안선을 바탕으로 삼각주 연안사주의 면적을 계산하였다. 각 연안사주의 시기별 면적(단위 : m^2)은 표 1과 같다. 1987년 연안사주의 면적은 진우도가 $805,376m^2$ 으로 가장 넓고 대마등이 $297,526m^2$ 으로 가장 좁게 나타났다. 1996년 연안사주의 면적은 역시 진우도가 $818,725m^2$ 으로 가장 크게 나타나고 있지만 신자도와 장자도가 각각 $602,128m^2$ 과 $596,877m^2$ 으로 나타나 $359,428m^2$ 로 현저히 줄어든 백합등에 비해 넓은 면적을 보인다. 1987년에 들어 처음 출현한 도요등은 $114,053m^2$ 으로 면적 측면에서는 가장 작은 연안사주에 해당된다.

2001년 해안선으로부터 계산한 연안사주의 면적은 진우도가 $926,208m^2$ 으로 가장 넓고, 신자도가 $657,893m^2$, 장자도가 $591,149m^2$, 백합등이 $368,156m^2$

표 1. 삼각주 연안사주의 면적변화

구 분	면 적(m ²)			면적 변화율*		순면적변화(m ²)	
	1987	1996	2001	1996	2001	1987~1996	1996~2001
진우도	805376.2	818725.7	926208.3	+1%	+15%	13349.5	107482.5
장자도	559531.2	596877.7	591149.4	+6%	+5%	37346.4	-5728.2
백합등	542687.8	359428.3	368156.4	-34%	-33%	-183259.4	8728.1
신자도	528414.5	602128.6	657893.0	+13%	+24%	73714.0	55764.4
대마등	297526.1	346395.9	209636.6	+16%	-30%	48869.8	-136759.3
도요등	0	114053.9	313992.3	0	+175%**	114053.9	199938.4

* 해당년도 면적을 1987년 면적으로 나눈 백분율 값

** 1996년 기준변화율

의 순서로 나타난다. 대마등이 209,636m²으로 가장 좁게 나타났으며 도요등은 313,992m²으로 나타났다.

연안사주 면적변화의 분석에서 두드러지는 측면은 그림 5에 나타난 것과 같이 백합등이 1987년에서 1996년으로 이어지는 시기에 급격하게 면적이 줄었다는 것과 그림 6에 나타난 것과 같이 1996년 처음 등장하는 도요등이 2001년까지 급속하게 성장했다는 것이다. 대마등은 앞서 해안선 변화에서 설명한 것과 마찬가지로 1996년과 2001년 사이에 진행된 골재 채취 작업을 통해 섬 내부를 수로형태로 변형시켜 면적이 현저히 줄어 들었다.

백합등의 면적 감소와 도요등의 출현과 성장은 서로 밀접한 연관성을 갖는다고 할 수 있다. 연안사주 해안의 동쪽 해안선을 구성하고 있던 백합등이 남쪽으로 퇴적이 가속화되면서 새로운 연안사주인 도요등이 출현

하게 되고 따라서 기존 해안선을 형성하고 있던 백합등은 퇴적물 공급의 감소로 쇠퇴하게 되는 것으로 사료된다.

신자도는 녹산수문의 축조로 낙동강 본류가 동낙동강으로 전환된 후, 퇴적활동이 활발해진 하구역 동쪽 해안을 중심으로 형성된 연안사주이다. 하구둑이 건설된 이후에도 신자도는 계속해서 성장하고 있는 것으로 나타났다. 신자도는 현재 낙동강 하구역의 해안선을 구성하고 있어 바다로부터 퇴적물의 공급이 지속적으로 이루어져 양쪽 끝으로 형성된 조수로 방향으로 퇴적이 진행되는 양상을 보인다. 진우도와 장자도는 1987년에서 1996년, 2001년에 이르는 기간 동안 면적 변화가 두드러지게 나타나지 않는다.

이러한 면적변화 양상은 1987년의 면적을 기준으로 하여 계산한 면적 변화율에서도 잘 나타난다. 우선 백

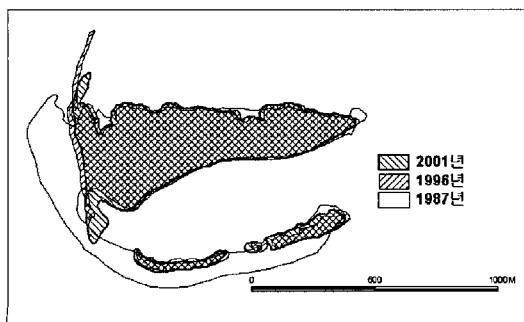


그림 5. 백합등의 해안선 변화

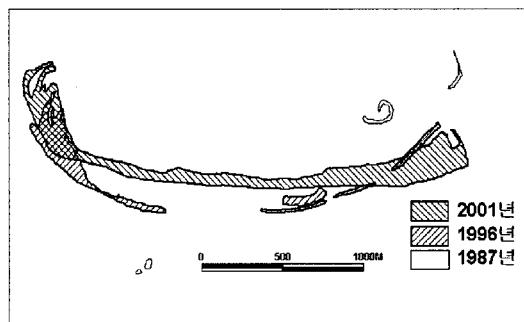


그림 6. 도요등의 해안선 변화

합등은 1987년에서 1996년, 2001년간의 면적 변화율에서 1987년을 기준으로 설정하였을 때 -34%와 -33%로 나타났다. 면적 변화율을 통해 볼 때 백합등은 1987년 면적의 약 3분의 1 정도가 1996년에 파괴된 것으로 확인할 수 있다.

이와 달리 도요등은 1987년에는 속등의 형태로 존재하여 기준으로 정할 수 없어 1996년의 면적을 기준으로 변화율을 계산한 결과 175%가 증가한 것으로 나타났다. 이 수치는 최초로 출현한 1996년도의 면적에 세 배 가까이 되는 규모로 성장이 진행되고 있음을 나타낸다. 이것은 도요등의 성장이 하구둑 건설 이후 급속도로 진행되고 있음을 보여준다.

2) 연안사주 도심의 좌표와 이동방향, 크기 분석

각 시기별 연안사주의 중심을 나타내는 도심과 전체 연안사주 해안의 도심을 표시한 것이 그림 5이다. 각 시기별 연안사주의 도심 좌표를 이용하여 실제 도심의 이동방향과 이동크기를 계산한 결과는 표 2에 제시하였다. 도심의 이동방향과 이동 크기를 바탕으로 연안사주의 형태변화를 분석하면 우선 도요등의 경우

626.80m로서 가장 큰 폭의 이동크기를 나타내고 있다. 이것은 실제 퇴적체의 이동보다는 1996년 동쪽과 서쪽으로 중앙이 분리되어 남쪽으로 불록한 초승달 형태에서 이후 2001년에 동서가 연결되어 하나의 커다란 연안사주로 변화하는 과정에서 나타난 것으로 보인다. 도요등 도심의 이동방향이 북동쪽으로 나타난 것도 이러한 과정을 잘 반영하고 있다.

퇴적체의 성장이 두드러지는 신자도의 경우 도심의 이동 크기 역시 다른 연안사주에 비해 두드러진다. 특히 연안사주의 서쪽에 위치하는 조수로 방향으로 성장이 두드러지게 나타난 1987년에서 1996년 사이의 기간에는 도심의 이동 크기가 522.77m로서 이러한 현상을 잘 설명하고 있다. 이후 2001년에도 신자도는 계속해서 성장하는 경향을 가지며 북서 방향으로 107.18m 정도 도심이 이동하고 하였다.

백합등의 경우는 도심이 이동하는 방향이 동쪽으로 나타나고 있으며 이동하는 크기 역시 335.03m로 크게 나타나고 있다. 이것은 앞서 연안사주 해안선 변화를 살펴볼 때 확인할 수 있었던 것처럼 'ㄷ' 자 형태로 남쪽과 북쪽의 퇴적체가 연결된 상태에서 해체가 진행되면서 나타나는 것으로 생각된다.

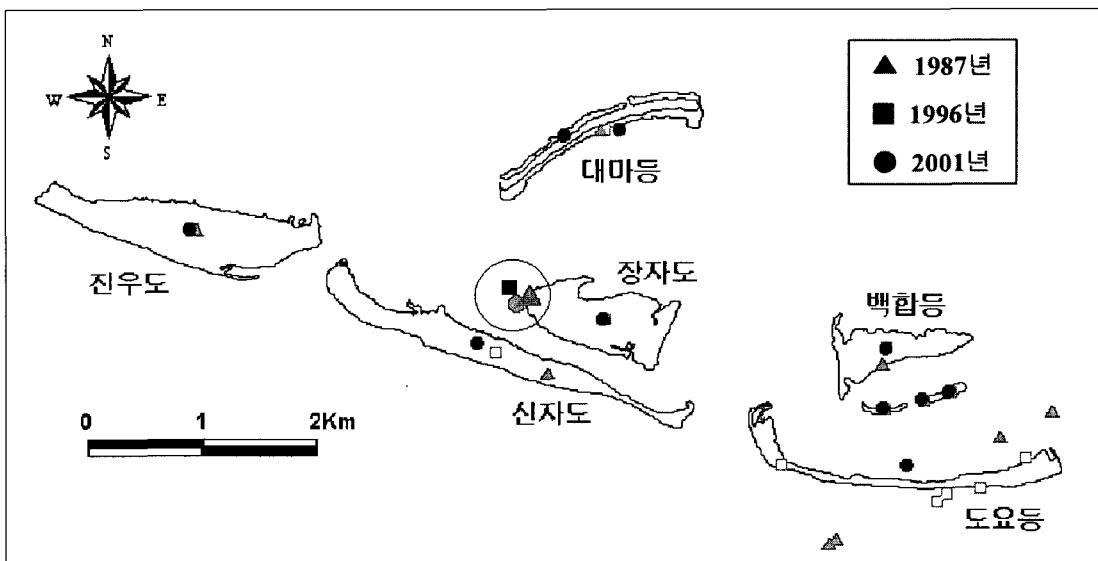


그림 7. 낙동강 삼각주 연안사주 도심의 위치변화

주 : 그림 중앙의 원 내부는 전체 연안사주 해안의 도심을 나타냄.

표 2. 연안사주의 도심 이동 방향과 이동 크기(단위 : m)

구 분	1987-1996	1996-2001
진우도	서/21.83	동/88.53
대마등	동/8.39	동/382.06
장자도	서/7.93	서/35.03
신자도	북서/522.77	북서/107.18
백합등	북동/335.03	남/16.33
도요동	남서/1327.22	북동/626.80
전체	북서/192.77	남/160.77

형태가 뚜렷하게 변화하지 않는 진우도와 대마등, 그리고 장자도는 도심이 이동하는 크기 역시 도요동이나 신자도, 백합등에 비해서 작게 나타나고 있다. 대마등의 경우 도심이 1996년에서 2001년에 이르는 기간에 크게 이동하였으나 이것은 앞서 연안사주 형태변화에서 살펴본 바와 같이 모래 채취 과정에서 형성된 수로로 인해 대마등 퇴적체가 둘로 구분되면서 퇴적체의 도심 역시 이동하게 되어 나타나는 수치상의 변화로 해석된다.

그림 7의 중앙에 표시된 것과 같이 낙동강 하구역에 형성된 퇴적체 전체를 대상으로 하는 도심의 이동 방향과 이동 크기는 우선 1987년에서 1996년 사이에 북서쪽으로 이동하는 것으로 나타난다. 그리고 이후 2001년까지는 남쪽으로 이동하고 있다. 이것은 1987년에서 1996년 사이에 두드러지게 퇴적체가 성장하는 곳이 신자도 서쪽 조수로 중심이기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 1996년에서 2001년 사이의 도심이 남쪽으로 이동하는 것은 이 시기에 퇴적체의 성장이 가장 활발한 도요동이 전체 낙동강 하구역에서 남쪽에 자리잡고 있기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구는 낙동강 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역의 삼각주 연안사주에 나타나는 지형변화의 공간적 변이를 살펴보는 것을 목적으로 하였다. 지형변화의 공

간적 변이를 파악하기 위해서는 무엇보다도 정확하게 미지형 요소를 추출할 필요가 있다. 이를 위해서는 정확한 해안선의 추출이 선행되어야 한다. 이 연구에서는 항공사진 측량기법을 이용하여 1987년, 1996년, 2001년의 해안선을 추출하여 연안사주의 형태변화 분석을 수행하였다. 연안사주의 형태변화 분석에는 해안선의 변화와 연안사주의 면적변화, 그리고 기하학적 중심인 도심의 이동방향과 이동크기를 살펴보았다.

하구둑 건설 이후 낙동강 연안사주의 형태변화 측면에서 볼 때, 도요동이 출현하여 지속적으로 성장하는 것이 두드러진다. 1987년까지만 해도 낙동강 하구역에서 도요동은 몇 개의 속등 형태로 분산되어 있었으나 1996년에는 동쪽과 서쪽으로 커다란 초승달 형태를 나타내면서 중앙부가 분리된 형태를 보였었다. 이후 2001년 해안선에서 도요동은 이전 시기에 동쪽과 서쪽으로 분리되었던 형태가 완전히 연결되어 하나의 연안사주 형태로 변화하였다. 실제로 2001년의 도요동은 1996년에 비해 그 면적이 2.75배로 증가하였다. 도요동의 이러한 성장양상은 배후에 위치하는 백합등의 쇠퇴양상 및 면적감소와 동시에 이루어지고 있었다. 1987년 당시, 뚜렷한 성장을 보이며 바로 남쪽에 위치하는 나무식등과 연결된 형태였던 백합등은 1996년에 남쪽의 나무식등이 상당 부분 파괴됨에 따라 분리된 형태가 되었다. 면적변화 분석 결과 2001년의 백합등 면적은 1987년 당시에 비해 0.67배로 감소하였다. 한편 신자도의 경우에는 하구둑 건설 이후에도 지속적으로 면적이 증가하여, 1996년에는 1987년 당시보다 1.13배로 면적이 증가했고, 2001년에는 1996년 당시보다 1.24배로 면적이 증가하였다. 마지막으로 진우도와 대마등, 장자도는 면적변화와 퇴적체의 중심인 도심의 이동이 거의 나타나지 않았다.

이 연구에서 밝혀진 낙동강 삼각주 연안사주 지형변화는 성장/정체/쇠퇴 양상으로 나타나고 있다. 현재 낙동강으로부터 유출이 이루어지고 있는 낙동강 본류의 하구를 중심으로 하여 현재의 해안선을 구성하고 있는 연안사주에서 성장 양상이 나타난다. 도요동과 신자도의 경우 해양 영력에 의해 지속적으로 퇴적물 공급이 이루어져 성장양상을 형성하고 있다. 외해쪽으로 새로운 연안사주가 출현하기 이전까지 해안선을 구성하고

있던 연안사주는 쇠퇴 양상을 보이고 있다. 백합등은 하구둑이 건설된 이후 도요등이 출현함에 따라 현재는 연안사주의 전면부가 파괴되어 사라지는 쇠퇴양상을 보이고 있다. 백합등의 쇠퇴양상은 도요등 배후 지역으로 음의 퇴적물 수지가 형성되고 있음을 지시한다. 연안사주 가운데 출현 시기가 가장 이른 진우도와 대마등, 장자도의 경우는 뚜렷한 성장이나 쇠퇴가 나타나지 않는 정체 양상을 나타내고 있다.

현재까지의 논의를 바탕으로 낙동강 하구역 일대에서는 연안사주 지형변화의 공간적 변이가 뚜렷이 발생하고 있는 것으로 파악되었다. 특히 항공사진을 이용하여 해안선을 추출한 후, 시계열적으로 연안사주 면적의 변화를 조사하는 과정에서 이러한 공간적 변이가 분명하게 입증되었다. 하구둑을 통한 하천수의 유출이 진행되는 방향에 위치하는 연안사주가 지속적으로 성장하는 것을 통해 하구둑의 건설로 인해 하천으로부터 퇴적물 공급이 완전하게 차단되지 않고 하천유로를 통해 제한적으로 집중되는 것을 확인할 수 있다. 또한 해양영력의 작용이 직접적으로 이루어지지 않는 연안사주가 쇠퇴하는 과정은 현재 하구역의 주요 퇴적과정이 해양영력에 의해 진행된다는 것을 보여주고 있다. 이는 하구둑 건설 이후, 하천 퇴적물의 유출과 파랑에 의한 퇴적물의 재이동 과정에서 국지적으로 퇴적양상의 강화 혹은 약화가 연안사주 별로 상이하게 발생할 것이라는 이 연구의 가정을 반영하는 결과이다.

3) 이 연구에서 이용한 항공사진은 1987년에 촬영한 11매와 1996년에 촬영한 13매, 2001년에 촬영한 13매로 모두 37매이며, 항공사진의 축척은 1/20,000이다.

4) 현재까지 연구지역을 표현하고 있는 지형도 내의 삼각주 연안사주 해안은 이 연구에서 제시하고 있는 그림 3에서 나타난 해안선을 기초로 표시되어 있다.

5) 연안사주와 같이 복잡한 형태에 대한 도심의 계산은 원과 사각형, 삼각형과 같이 계산이 용이한 도형으로 분리한 후 계산한 각각의 도심을 면적의 크기로 가중치를 주어서 합산하는 과정으로 진행된다. 도심의 구체적인 계산식은 다음과 같다.

$$Cx = \frac{\sum_n AnCx_n}{\sum An} \quad Cy = \frac{\sum_n AnCy_n}{\sum An}$$

(Cx : y 축과 도심과의 거리, Cy : x 축과 도심과의 거리,
 An : 해당 도형의 면적)

6) 경상남도 양산시 물금읍에서 마지막 지류하천인 양산천과 합류하는 낙동강은 남해로 유입하는 과정에서 대저도를 사이에 두고 크게 동낙동강과 서낙동강으로 분류한다. 1934년 농업용수를 취입하기 위한 대저수문과 염해방지와 배수조절을 위한 녹산수문이 축조되기 전까지는 서낙동강이 낙동강의 본류에 해당하였으나, 현재 대저수문과 녹산수문 사이의 하도는 담수호의 기능으로 바뀌었고 동낙동강이 본류의 기능을 담당하고 있다.

7) 낙동강 하구둑은 을숙도를 가로질러 동서로 축조되어 있으며, 동쪽으로는 6개의 주수문과 4개의 조절수문으로 이루어진 수문부가 설치되어 있고 서쪽으로는 토언제가 축조되어 있다. 현재 낙동강 본류의 유출을 수문부가 설치되어 있는 을숙도의 동쪽 유로를 통해서만 이루어진다.

8) '동'은 수면상으로 드러난 사주지형을 지역 주민들이 부르는 것으로 소의 진동처럼 높고 평평하다는 의미를 갖고 있다. '속동'은 퇴적이 진행되는 과정에서 수면상으로 모습을 드러내기 이전의 지형을 지칭한다.

註

- 1) 낙동강 하류지역의 연안사주군에 대한 명칭 중에서 신자도(새등), 도요등(철새등)과 같은 경우는 지역 주민과 학자, 그리고 행정기관에 따라 다르게 불리고 있다. 이 연구에서는 부산광역시와 부산발전연구원 간행물에서 명시한 명칭을 기준으로 사용하기로 한다.
- 2) 국토지리정보원에서는 지형도의 제작과 국토의 변화 탐지 및 역사적 자료로서의 활용을 위해 항공사진을 주기적으로 촬영하고 있다. 국토지리정보원의 항공사진 촬영 주기는 1/20,000 축척의 항공사진을 전국을 대상으로 5년의 주기로 촬영하고 있다. 이 연구에서 이용한 항공사진은 국토지리정보원에서 제공한 최근의 자료에 해당한다.

文獻

- 반용부, 1984, “낙동강 하구의 간석지,” 자리학연구, 9, 537-559.
- 반용부, 1986, “낙동강 하구 연안사주 지형,” 부산여대논문집, 21, 463-518.
- 반용부, 1987, 낙동강 삼각주의 지형과 표층퇴적물 분석, 경희대학교 박사학위논문.
- 반용부, 1995, “낙동강 하구 연안사주 지형의 변화,” 부산여대논문집, 40, 155-195.

- 반용부, 1997, “낙동강 삼각주 지형 경관 변화,” 부산여자대학교 자연과학연구소 논문집, 3, 111-138.
- 반용부, 2003, “낙동강 유역분지 지역의 지질과 지형,” 낙동강백서, 3-41.
- 반용부, 2004a, “대저도의 지형경관 변화,” 부산연구, 1, 7-51.
- 반용부, 2004b, “명호도 남단의 Barrier Islands 지형변화,” 부산연구, 1, 53-99.
- 반용부, 2005a, “낙동강 삼각주의 환경,” 부산연구, 2, 7-49.
- 반용부, 2005b, “낙동강 하구에 발달한 연안사주,” 낙동강 하구둑의 득과 실.
- 부산광역시, 2004, 명지대교 건설사업 환경영향평가서.
- 부산대학교 · 부산발전연구원 · Ramsar Center Japan, 1998, 낙동강 하구 습지의 보전과 관리.
- 부산발전연구원, 2005a, 낙동강 하구역의 생태 · 경제학적 가치 평가와 관리방안에 관한 연구.
- 부산발전연구원, 2005b, 낙동강 하구둑의 득과 실.
- 부산지방환경청, 1992, 낙동강 하구연 축조전후 주요환경 변화조사.
- 서울대학교기초과학연구원, 1998, 낙동강하류 철새도래지 생태계 보존대책 연구.
- 오건환, 1988, “낙동강 하구둑 건설로 인한 삼각주 말단의 지형변화,” 낙동강, 7, 38-47.
- 오건환, 1992, “낙동강 삼각주의 형성과정,” 부산지리, 1, 1-16.
- 오건환, 1999, “낙동강 삼각주 말단의 지형변화,” 한국제4 기학회지, 13(1), 67-78.
- 한국수자원공사, 1988, 낙동강 하구둑 공사지, 77-114.
- Carter, R.W.G., 1988, *Coastal Environment*, Routledge.
- Elliot, T., 1986, Deltas, in Reading, H.(ed), *Sedimentary Environments and Facies*, Oxford, 113-154.
- Fisher, J.J., 1968, Barrier island formation: Discussion, *Geol. Soc. America Bull.*, 79, 1421-1426.
- Goudie, A., 2000, *The Human Impact on the Natural Environment*, MIT Press.
- Goudie, A., 2004, *Encyclopaedia of Geomorphology*, Routledge.
- Guo, Q. and Psuty, N., 1997, Flood-tide deltaic wetlands : Detection of their sequential spatial evolution, *PE&RS*, 63(3), 273-280.
- McBride, R.A., et al, 1995, Geomorphic response-type model for barrier coastlines: A regional perspective, *Marine Geology*, 126, 143-159.
- Oertel, G.F., 1985, The barrier island system, *Marine Geology*, 63, 1-13.
- Pethick, J., 1984, *An Introduction to Coastal Geomorphology*, Edward Arnold.
- Pilkey, O.H. et al, 2004, *How to Read a North Carolina Beach*, Chapel Hill.
- Stutz, M.L. and Pilkey, O.H., 2001, A review of global barrier island distribution, *Journal of Coastal Research*, 34, 15-22.
- Stutz, M.L. and Pilkey, O.H., 2002, Global distribution and morphology of deltaic barrier island systems, *Journal of Coastal Research*, 36, 694-707.
- Titus, J.G., 1990, Greenhouse effects, sea level rise, and barrier islands: case study of Long Beach Islands, New Jersey, *Coastal Management*, 18, 65-90.
- 교신 : 김성환, 151-742, 서울시 관악구 서울대학교 국토 문제연구소(phygeokim@chol.com, 전화 : 02-880-6358)
- Correspondence : Sung Hwan kim, Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University, San 56-1 Shinilm-Dong Kwanak-Gu, Seoul, 151-742 Korea (phygeokim @chol.com, Phone : 02-880-6357)
- 최초투고일 05. 8. 15
최종접수일 05. 9. 15