

낙동강 하구역 삼각주 발달에 관한 문헌 고찰 연구

윤한삼* · 유창일** · 강윤구*** · 류청로**

*부경대학교 해양산업개발연구소

**부경대학교 해양공학과

***주)삼성물산 건설부문 항만팀

Delta Development in the Nakdong River Estuary: a Literature Survey

HAN-SAM YOON*, CHANG-ILL YOO**, YOON-KOO KANG*** AND CHEONG-RO RYU**

*Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Port Management Team, Engineering Construction Group, Samsung Corporation, Sungnam, Korea

KEY WORDS: Nakdong river 낙동강, Estuary 하구역, Sandy barrier 사주, Delta 삼각주, Estuarine deposit 하구퇴적층, Historical development 발달사, Development mechanism 발달 기작, Literature survey 문헌 고찰

ABSTRACT: We present basic data for developing new research topics and closely examine the existing data on the development and organization of the Nakdong River Estuary Delta by analyzing various studies of the area, including ocean engineering, coastal engineering, ocean environmental engineering, geomorphological, and geological studies. We first defined the general concepts related to the estuary and delta and reviewed the historical development of the Nakdong River Estuary Delta over the past 100 years. We then examined the origin and core elements of the estuary deposits that constitute the delta. In addition, we scrutinized the main factors affecting the development of the delta and analyzed existing research on delta development mechanisms by core researchers. The construction of an estuary barrage is one of the main factors effecting estuarine circulation and has altered the physical oceanic environment, area of deposition, atmospheric environment, and vegetation community of the delta. These factors affect the estuary circulation in turn, altering the delta. Along the Nakdong River, an unsteady-state sandy barrier appears at approximately three times the distance of the wavelength of incident offshore waves, and this terrain forms approximately 10-15 years after reclamation in the interdistributary upper stream and transforms the shoreline. It is necessary to develop a technique to predict terrain change that reproduces the erosion and accumulation of estuarine deposits. To determine the parameters and variables necessary to reproduce this system, continuous on-site monitoring is necessary. The existing research did not fully examine the terrain changes in Nakdong River Estuary or the periodic developmental characteristics. To understand the future process of estuary delta development, it is necessary to establish an integrated management system.

1. 서 론

우리나라 대표적인 하구역(Estuary)인 낙동강 하구역의 경우 하중도(Interdistributary island, Upper delta), 하중도의 전면에 형성된 모래톱(Shoal)이 발달하여 형성되는 사주(Barrier islands, Lower delta), 위 두 지형을 연결하는 간석지(Tidal flat, Intertidal zone)로 이루어져 있다(오건환, 2001). 특히, 낙동강 하구언(Estuary barrage) 건설 후 하구역의 사주들이 다양하게 변화되었고, 지속적으로 외해방향으로 발달하고 있다(부산광역시, 2004). Fig.1은 1975년 이후 2004년까지의 낙동강 하구역 위성사진을 정리한 것으로 사주의 발달과정과 주변 해안선의 변화를 살펴볼 수 있다.

이러한 낙동강 하구역은 일반적으로 주변 환경의 기후, 강우, 하천유량, 유입토사 등에 의해 육역으로부터의 영향뿐만 아니

라, 해역의 파랑 및 조석작용, 하구의 지형적 특징, 하구내부 수심조건, 주변연안의 개발여건 등에 따라서 하구역내 수괴의 거동이 다양하고 복잡해진다(유창일 등, 2006). 또한 유입토사의 이동 및 퇴적작용이 복합적으로 발생함으로써 하구 천해역에서는 수괴의 흐름 감소, 퇴적물 침강속도의 강화, 유입되어진 토사의 퇴적작용에 의해 하구천수화(Estuary shoaling) 및 삼각주(Delta)가 형성된다.

삼각주(Delta)는 하천, 바다, 호수에 수괴가 유입할 때 하구를 중심으로 운반되던 물질(토사)이 쌓여서 형성되는 퇴적지형이다. 오늘날 지형학자 또는 지질학자들 간에 가장 보편화된 삼각주의 정의는 Barrell(1912)의 정의로서 '삼각주(Delta)란 영구적인 수괴로 흘러들어가는 하천에 의해서 형성되는데 육성층(Land deposit)과 해상층(Marine deposit)의 조합으로 구성되어 있으며 그 일부가 수면상에 나타나 있는 퇴적지형'을 나타낸다(권혁재, 1973).

또한 하구역에 생성되는 삼각주는 기후환경변화 또는 인위적인 하구역 주변 개발과 밀접한 관계를 가지고 생성 발달 또

교신저자 윤한삼. 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6256 yoonhans@pknu.ac.kr

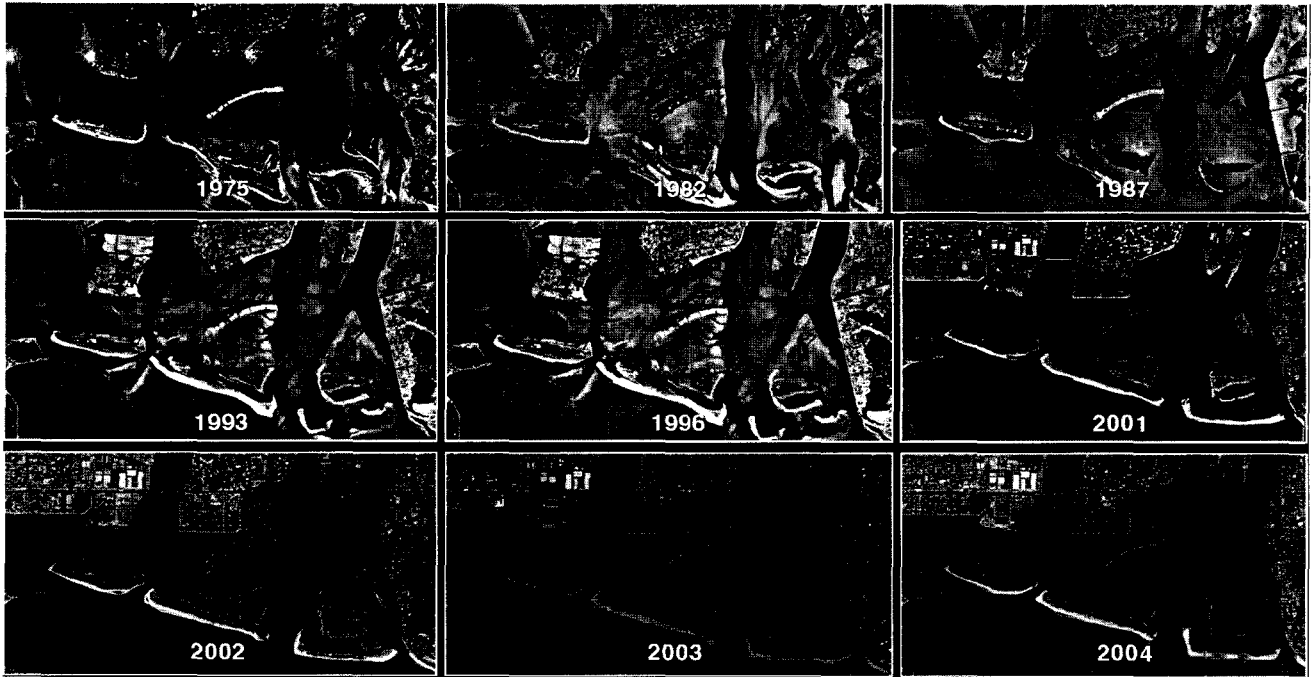


Fig. 1 LANDSAT image showing the topographic variation and delta of the Nakdong River Estuary(채장원, 2007)

는 사멸하는 것으로 장래 하구역 개발에 있어서 적합한 해역 개발방향과 대책을 명확하게 수립하고 실시할 경우에만 그 해역의 환경피해를 최소화시킬 수 있다. 이를 위해서는 과거 하구역 개발과정을 종합적이고 비판적인 시각에서 되돌아보고 그 하구역의 육역 및 해역의 환경조건을 면밀히 검토함과 아울러 당 해역의 환경변화패턴을 명확히 이해할 필요가 있다.

낙동강 하구역의 지형변화와 관련하여 기존 연구결과를 정리해 보면 다양한 학문분야에서 연구가 수행되어졌음을 알 수 있다. 예로 들면 지질·지리학적 관점에서 표층퇴적물의 입도분석과 광물분석을 통한 사주군 퇴적물의 기원 분석(김원형과 이형호, 1980; 김석윤과 하정수, 2001), 퇴적물의 기원과 입도분석을 통한 사주 지형의 형성변천사(반용부, 1986; 1995), 낙동강 하구인 건설후 연안사주 지형변화(Kim, 2005) 등이 수행된 바 있다. 아울러 이와 같은 지형변화를 수치실험으로 모의한 연구결과로는 파랑수치모형을 이용한 퇴적지역의 수치예측(김상호 등, 2003), 3차원 해수유동모형을 이용한 하천수의 영향범위 예측(이종섭과 윤은찬, 2003; 이종섭 등, 2003), 실제 지형변화에 미치는 해빈류의 영향 평가(김재중 등, 1995) 등이 보고된 바 있다.

그러나 지금까지의 낙동강 하구역에 대한 연구 문헌들은 대체적으로 개별 연구분야별 도출결과이거나 개별원인 분석을 통해서 전체 하구역 삼각주 지형변화를 평가하고자 하는 노력에 제한되어 있어 하구역의 개발과 환경에 대한 이해도를 향상시키는 작업에 있어서 미흡하다고 판단된다. 아울러 기존 연구결과에서 낙동강 하구역 삼각주 지형의 생성·발달 원인을 명확히 규명하였다고 판단하기에는 미흡하며, 사주지형의 시·공간적 변화를 단기간의 연구결과를 바탕으로 판단하기에는 무리가 따를 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 기존 낙동강 하구역에 대해서 해양공학, 해안공학, 해양환경공학, 지형학, 지질학 등 다양한 학문 분야에서 수행되어진 연구 결과를 수집·분석하여 현재까지 밝혀진 낙동강 하구역 삼각주의 발달 기구를 규명하고 향후 새로운 연구과제를 도출하기위한 기초적 자료를 제공하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 하구역 및 삼각주의 일반적 개념을 정립하고 과거 100년간의 낙동강 하구역 삼각주의 변천사를 살펴보았으며, 삼각주를 구성하고 있는 하구퇴적층(Estuary deposit)의 기원 및 구성요소를 정리하였다. 아울러 이러한 삼각주 발달에 영향을 미치는 주요 영향 요소들을 살펴보고 현재까지 주요 연구자들에 의해 밝혀진 삼각주 발생 기작에 대한 연구결과를 정리하였다. 마지막으로 현재까지 도출되어진 연구결과를 토대로 향후 낙동강 하구역 삼각주와 관련된 연구분야를 개략적으로 제시하고자 한다.

2. 낙동강 하구의 삼각주

2.1 하구역의 일반적 개황

하구역(Estuary)은 우리나라에서는 기수역 등의 이름으로 불리는 지역으로서 이에 대한 정의가 매우 다양하며 한마디로 규정짓기는 매우 어렵다. Estuary는 연안의 반폐쇄된 수역으로서, 그 범위는 조수의 영향이 미치는 곳까지 이르며, 외해와는 하나 이상의 통로를 통해 연결되고 있어 해수의 유입이 자유롭게 일어나며, 육상에서 유출된 담수에 의해 해수가 희석되는 환경을 가지고 있기 때문에 염분에 적응한 생물들이 일생의 일부 또는 전부를 유지하는 장소를 일컫는다(Perillo, 1995). 즉, 이 정의에 따르면 강어귀(Estuary), 연안의 만(Bay), 연안사주(Barrier island), 연안사주 후면의 석호(Lagoon), 삼각주 (Delta)등이

광의의 하구역에 포함될 수 있다(서종철과 박경, 2006).

이러한 하구의 형태는 일반적으로 2가지로 분류되는데, 흐름(하천류 및 조류)과 토사이동 측면에서의 관점이 그것이다(이원환, 1975). 먼저 흐름측면에서 분류하면 ① 하천유형은 하천 유량과 하상경사(Bed slope)가 큰 하천으로서 하천유량만의 변화에 따라서 하구의 개방도가 변하는 형이며, ② 파랑유형은 조위차가 작고 하천유량도 적으며 외해 입사파랑에 의한 흐름이 우세한 형이고, ③ 조석유형은 조위차가 크며 만입부가 큰 하천의 하구로서 그 단면적이 어느 정도 유지되고 있는 형이다. 토사이동측면에서의 하구 형태로는 ④ Hydrological background를 가진 하구로서 하천류와 조류의 영향이 강하므로 그 유량에 대응할 형태를 가지며 상류로 갈수록 육수 단면적이 감소된 하천지역으로서 서해안 하구가 이에 해당하며 ⑤ Littoral drift background를 가진 하구로서 해안지대로 유입되는 하구 토사량이 탁월하여 하구사주를 형성하게 되어 하구폐색(River-blockage) 작용이 일어나는 하구를 나타내는데 동해안 하구가 이에 해당한다. 남해안 하구의 경우 ④와 ⑤의 중간과정에 있다고 볼 수 있으나 낙동강 하구만은 특이한 성질을 가진다고 보고된 바 있다.

이러한 하구역의 환경변화를 야기하는 영향요소로는 일반적으로 주변 지역의 기후, 강우, 하천유량, 유입토사 등 육역으로부터의 영향뿐만 아니라, 해역의 파랑 및 조석작용, 하구의 지

형적 특징, 하구내부 수심조건, 주변연안의 개발여건 등 하구역 내 토사의 이동 및 퇴적작용에 미치는 영향은 다양하고 복잡하다. 특히 하구역 토사 거동에 영향을 미치는 주요 흐름으로는 이들 흐름이 발생하는 원인별로 분류된다(박상길과 최병섭, 1997). ① 해수면과 바람과의 응력에 의해 발생하는 취송류(Wind drift current), ② 수면경사 때문에 발생하는 경사류(Gradient current), ③ 조석현상에 의해서 생기는 조류(Tidal current), ④ 연안쪽에서의 파랑에 의해 야기되는 연안류(Nearshore current) 그리고 ⑤ 하구의 해수와 담수의 밀도차에 의한 밀도류(Density current) 등으로 나누어진다. 이중 파랑에 의해 야기되는 흐름에는 ④ 파의 진행방향으로 질량을 수송하는 흐름, ⑥ 쇄파에 따라 생기는 연안류 및 ③ ④과 ⑥에 의해 연안쪽에 집중한 흐름이 외해로 되돌아가는 이안류(Rip current)가 있다. Shepard and Inman(1950)은 취송류, 경사류, 관성류(Inertia current), 조류를 해안류(Coastal current)라 하였고, 파랑에 의한 흐름을 해빈류 계통(Nearshore-current system)이라 하였다. 아울러 Garvine(1977)에 의하면 하구역에서는 하천유출수로 인해 외해역까지 저역의 담수 플룸(Plume)이 형성되며 주변 수괴와 전선을 형성하여 확산되고, 조류에 의해 변동되는 양상이 뚜렷하다고 밝혔다. 즉, 하구의 순환기작은 조류와 파랑, 하천유출수의 혼합과 확산 양상에 크게 좌우됨을 의미한다.

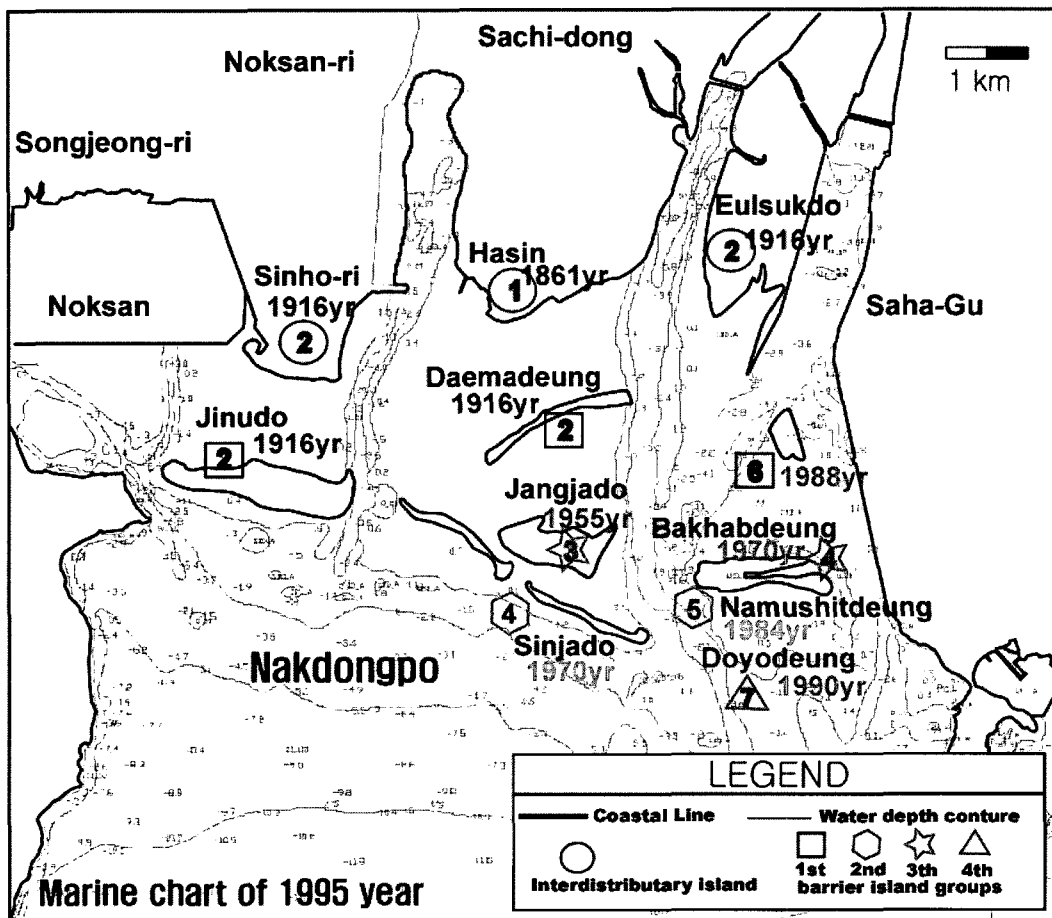


Fig. 2 Development of the barrier islands in the Nakdong River Estuary

이와 같은 하구역의 규모를 결정하는 요인은 조차(Tidal range)와 하상경사이다. 서해안과 같이 조차가 7미터 이상인 대조차 환경에서는 특히 담수와 염수의 교환으로 인한 염도의 구배가 다양하게 나타난다. 더구나 하천 경사가 완만한 경우 두 수체가 혼합되는 구역이 넓어진다. 하구역에 미치는 조수의 중요성을 고려하여, Hayes et al.(2000)는 Davis(1994)의 해안분류체제를 도입한 후 하구역을 대조차(Spring range), 중조차(Mean range), 소조차(Neap range) 하구역으로 분류한 바 있다. 서종철과 박경(2006)은 하구역 조차를 기준으로 1) 서해안에 대해서 조차가 4 m 이상인 대조차 하구역, 2) 남해안의 경우 조차가 2 m에서 4 m 사이인 중조차 하구역, 3) 동해안에 대해서 조차가 2 m 이하인 소조차 하구역으로 구분하였다.

하구역에서 발달하는 삼각주는 해안에서 외해방향으로 더 연장되어 성장하므로 하구역의 육지 인근에서 형성되는 사주 지형과는 형태상 구분되며, 삼각주가 형성되려면 하천에 의해 운반되는 토사의 양이 커야 한다. 즉, 하천의 하구부에서는 파랑과 연안류의 작용뿐만 아니라 조류의 작용도 동시에 일어나기 때문에, 퇴적물의 유입속도가 퇴적물을 제거하고 분산시키는 속도보다 커야한다(서종철과 박경, 2006). 하구역에서는 조류의 영향이 중요한 인자인데 반해, 삼각주에서는 조류나 파랑에 비해 육상에서 운반되는 하천퇴적물의 양이 더 중요한 인자로 작용한다. 서로를 분리하는 명확한 물리화학적 기준은 아직 설정되어 있지는 않지만, 양자는 지형이라는 외관에 의해 잘 구분되므로 별도로 구분가능하며 낙동강 삼각주가 그 예이다.

2.2 낙동강 삼각주 발달사

우리나라 대표적인 하구역인 낙동강 하구역의 경우 하중도(예로, 명지도, 을숙도), 하중도의 전면에 형성된 모래톱(Shoal)이 발달하여 형성되는 사주(대마등, 장자도, 새등(또는 신자도), 백합등, 나무섬등, 맹금머리등, 도요등 (여기서 ‘등’은 수면상으로 드러난 사주지형을 지역주민들이 부르는 것으로 소의 잔등처럼 높고 평평하다는 의미), 위 두 지형을 연결하는 간석지로 이루어져 있다(오건환, 2001).

기존 연구결과를 중심으로 낙동강 하구언 건설전·후의 사주 지형생성 변천사를 정리해보면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 하중도 남측으로 4개의 대표적인 사주군이 형성되고 있으며, 사주군의 발달 방향은 북서측에서 남동측으로 발달하고 있다. 1995년의 최근 해도에는 도요등의 형상이 나타나지 않지만 Fig. 1의 위성사진에는 도요등의 생성이 1993년 이후 지속적으로 발달하여 왔음을 나타내고 있다. 각 사주군의 생성년도는 제 1사주군은 1904~1916년, 제 2사주군은 1955~1970년, 제 3사주군은 1983년~1996년에 생성되었으며, 사주간의 이격거리는 3개의 사주군이 약 1.2~1.6 km의 일정한 거리로 발달하고 있으며, 사주군과 사주군 사이에 조간대가 형성되어 지금의 낙동강 하구역의 지형을 형성하고 있다(유창일, 2006).

권혁재(1973)는 낙동강 삼각주는 3개의 주요지형단위 즉, 상부삼각주, 하부삼각주 및 삼각주 주변분지로 구분하고 본 연구의 관심대상지역인 하부삼각주에 대해서 사주, 간석지, 해안퇴적평야로 구성되어 있다고 제안하였다. 삼각주의 전면을 이루

는 사주의 형성은 현상태의 하구를 중심으로 가장 활발하게 진행되었는데 일련의 사주가 낙동포를 향하여 불연속적으로 발달하는 것이 특이하며, 홍수시 낙동강의 집중적인 하천유출은 사주의 발달과 관련이 있음을 주장하였다. 또한 파랑의 영향과 물질의 공급을 직접 받는 최남단의 사주는 성장하는 반면에 그 배후의 사주는 침식되어 작아지고 있으며, 간석지는 사주와 더불어 삼각주의 전방으로 뿐만 아니라 서쪽으로 해안을 따라서 성장하고 있다고 보았다. 오건환(2001)은 삼각주 발달의 미지형 배열은 삼각주가 하구 부근에 운반된 토사가 연안류와 조류의 영향으로 퇴적되어 수중사주→사주→하중도→전면→신사주→합성→하중도의 과정을 거치면서 발달되어 온 결과라고 주장하고 이는 일반적인 갯벌지형 형성이론과는 달리 하구의 수로 방향에 거의 직각으로 분포하는 특징을 가진다고 밝혔다.

이와 같은 하구역 지형들은 인위적인 연안역 개발 공사에 따른 낙동강의 수력학적 특성변화를 반증하고 있으며 이로 인한 지형 변화는 낙동강 하구는 물론 인접한 진해만까지 영향을 미치고, 결과적으로 주변해역의 퇴적환경에 상당한 변화를 초래할 것으로 예상된다(김석윤과 하정수, 2001). 그 사례로 항로 매몰로 인한 어선 통행로의 협소화 및 수심저하 등으로 1999년 이후 2004년까지 총 19회의 해난사고가 발생하였으며, 주변해역의 수심 감소로 인해 하천 방류수의 외해 유출 지연 및 인근 저지대의 상습적인 침수발생 우려 고조, 매년 반복적으로 내습하는 태풍 및 이상폭우시 해안지역의 침수피해가 더욱 우려된다(부산광역시 강서구청, 2004). 또한 기존 하구언 건설과 신항만 건설 공사 등 각종 국책 대형공공사업의 시행이 낙동강 하류수역의 조류변화 및 낙동강하구 일원의 공유수면에 불특정 사주 발달을 야기시켰다고 보고된 바 있다.

이상의 연구결과를 바탕으로 하구언 건설과의 상관성을 검토해보면 하구언 건설전의 경우 분류를 통해 유출된 토사가 해안에서 해수와 혼합되어, 외해로의 유출강도가 높았으나, 하구언 건설 이후에 수괴의 차단으로 유속 감소와 토사 침강속도 증가에 따른 하구천수화(Estuary shoaling) 작용이 강화되어 토사의 이동 저감 및 퇴적작용을 반복하는 것으로 요약할 수 있다. 이와 같이 낙동강 하구역의 사주 및 조간대는 주변 해역개발 여건에 따라서 내·외부 외력조건들이 상호작용하여 생성시키는 결과물이라고 할 수 있다.

2.3 낙동강 하구퇴적층 구성요소

낙동강 삼각주는 낙동강이 구포 상류에서 처음 동·서의 2개 분류로 갈라지는 곳에서부터 약 20 km 하류의 삼각주 전면에 위치한 일련의 사주(Barrier island)까지 계속된다. 광범위하게 분포하는 삼각주의 하구퇴적층의 퇴적특성을 살펴보기 위해 기존 연구문헌에서 시추를 통한 연직 하구퇴적층의 분석결과와 표층퇴적물의 분석결과를 중심으로 검토하였다.

먼저 시추를 통한 연직 하구퇴적층의 연구결과를 정리하면 낙동강 삼각주는 후빙기(Post glacial age)의 해면상승으로 인해 형성된 낙동포에 퇴적물이 지속적으로 퇴적된 것으로 해석하는 것이 일반적이다. 이는 퇴적물이 표층을 제외하면 전부 수중에서 퇴적된 후 대기중에 노출된 일이 없고 또 폐각이 될

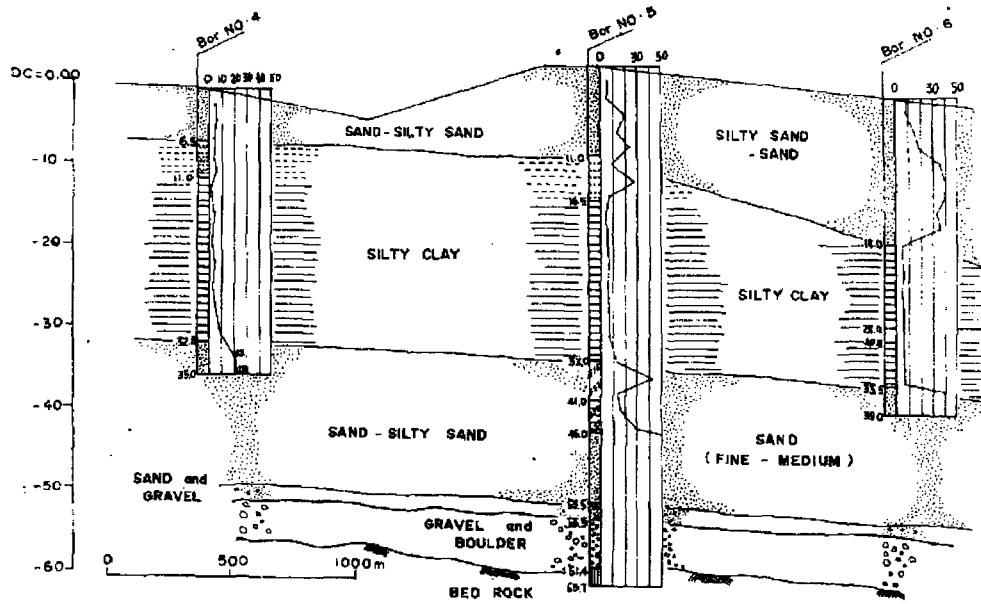
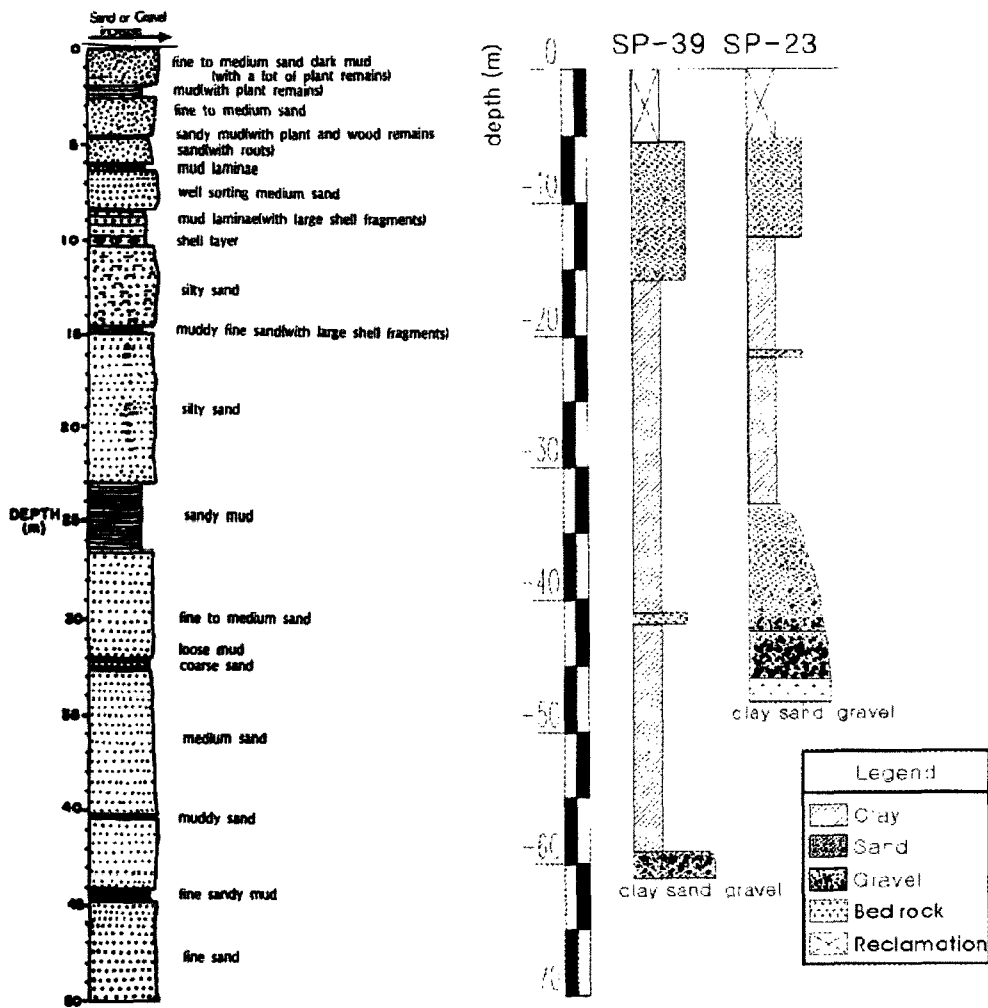


Fig. 3 Stratigraphic description of sediment deposits at three stations in the Nakdong River Estuary Delta (Ban, 1985)



(a) Eulsukdo region(Eun et al., 1998)

(b) Noksan region(Lee et al., 2005)

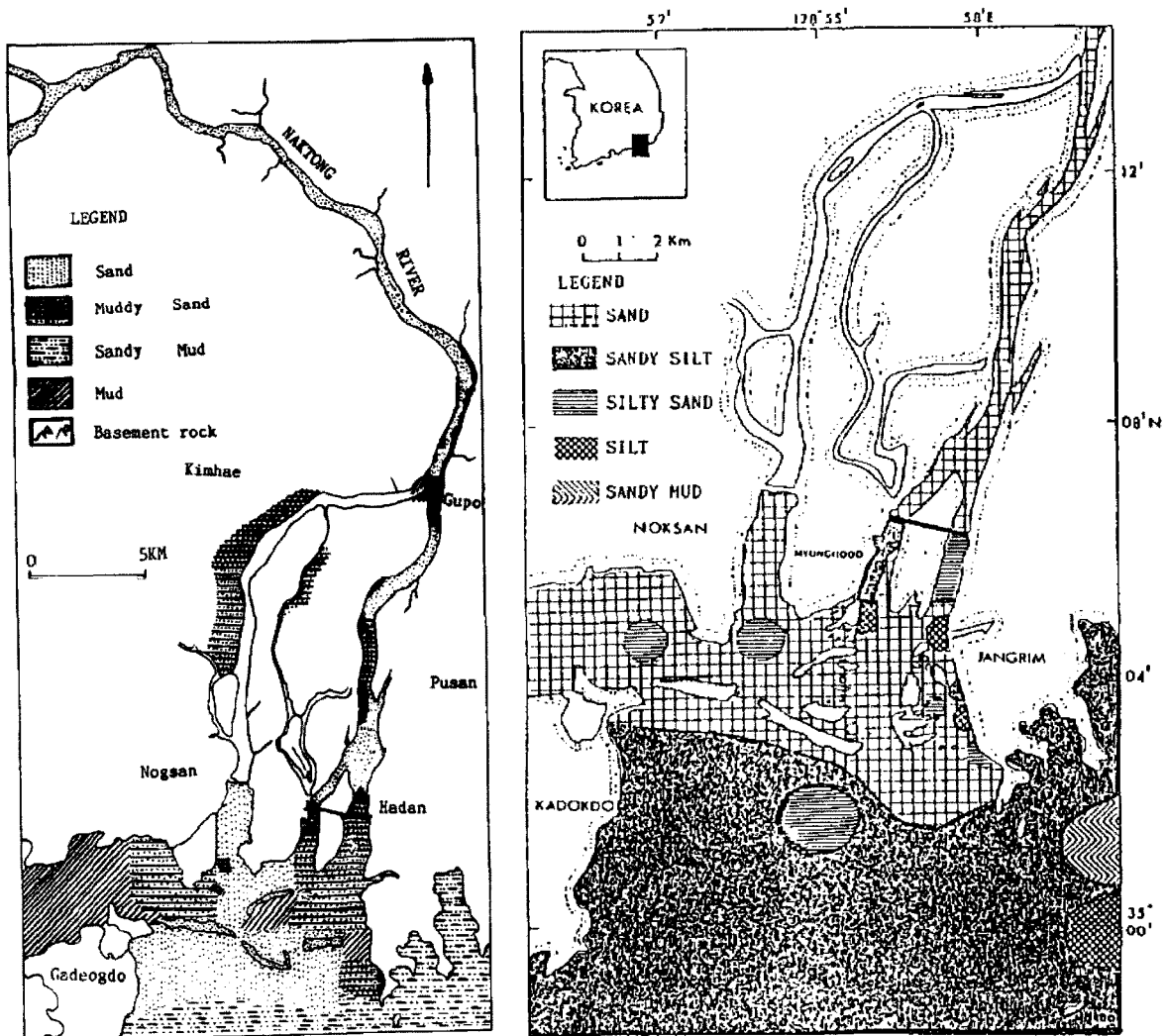
Fig. 4 Stratigraphic description of sedimentary deposits in the interdistributary island region of the Nakdong River Estuary

리 분포되어 있는 등의 사실에서 알 수 있다(권혁재, 1973). 또한 반응부(1984)는 낙동강하구 삼각주는 제4기 미고결상태의 충적층으로 자갈(Gravel), 모래(Sand), 실트(Silt), 점토(Clay)로 구성되어 있으며 Fig. 3과 같이 현재 낙동강 하구의 해수면으로부터 약 60m 깊이에 기반암이 있으며, 기반암의 표면은 상류에서 하류로 경사져 있고 그 위에 Gravel→Gravel & Sand→Sand or Silty sand→Silty clay→Clay sand로 퇴적상이 변화한다고 보고하였다. 이를 바탕으로 낙동강 하구는 초기 하구가 아니었으며 해수면의 상승과 홀로세(Holocene) 시기에 해면의 하강, 후빙기에 다시 해수면 상승으로 현재의 상태에 이르렀다고 밝혔다.

삼각주 심도별 특성을 고찰한 Eun et al.(1998)의 연구에 따르면 Fig. 4(a)에서와 같이 낙동강 을숙도에서의 시추 코어결과를 바탕으로 전체적으로 모래가 우세하고 일정한 수력학적 조건을 암시하는 분급이 매우 양호한 퇴적층이 나타나 비교적 다양한 퇴적환경적 변화를 겪으며 형성된 것으로 추정하였다. 특히, 시추심도 2.0m부터 2.5m 사이 구간에서 나타나는 식물파편

이 다량 포함된 검은 니질층은 식생이 발달한 소택지나 늪지 환경에서 형성을(Traverse, 1988), 시추심도 9.5~10.3m 사이의 패각층은 해안선 근처에서 파도의 침식작용에 의한 형성(Reineck and Singh, 1980)을 특징적으로 나타내었다. 또한 Fig. 4(b)에서와 같이 Lee et al.(2005)은 류춘길(2003)의 연구를 바탕으로 연구대상지역은 심도 약 30m를 중심으로 약 20-40m의 중간층에서 점토광물이 많고 석영 및 장석의 함량이 적은 특징을 보이는데 이는 해수면 상승에 따른 퇴적환경변화와 일치하는 것으로 해석하였다. 또한 이를 바탕으로 낙동강의 삼각주 생성 단계를 빙하기 후기 해수면 상승 초기(조간대), 해수면 상승에 따른 해양환경(내만성 천해), 낙동강 하구 퇴적환경(조하대)의 변화로 크게 3단계로 구분하였다.

Fig. 5는 Kim(1988)과 Lee(1993)의 낙동강 하구역의 표층퇴적물의 공간적 분포를 나타내고 있는데 이를 통해서 시대적으로 퇴적물의 공간분포가 변화하여 왔음을 알 수 있다. Lee(1993)는 낙동강 하구 수역의 모래 퇴적물은 주로 수로와 사주 배후면에, 실트 퇴적물은 외해에 우세하게 분포하며 퇴적물 운반과정



(a) 1987 year (Kim, 1988)

(b) 1992 year (Lee, 1993)

Fig. 5 Geological map of the Nakdong River Delta showing the distribution of bottom sediments

은 사질 퇴적물은 주로 도약상태로 조간대와 얇은 곳으로, 실트와 펄 퇴적물은 부유상태로 깊은 곳과 수로로 운반됨을 주장하였다. 또한 유기물과 탄산염 함량 범위는 각각 0.2-23.8%와 0.6-39.4%이며 이들의 함량분포는 수심과 관련이 있고 이를 바탕으로 낙동강 하구역은 사주를 중심으로 Onshore area와 Offshore area로 구분하였다.

김기현 등(2000)은 낙동강 하구역의 표층퇴적물의 공간적 분포를 살펴본 결과, 낙동강 하구 및 주변해역에서의 평균입도는 하구언 안쪽인 경우 8.6Φ(Clay 함량 63%), 하구언 바깥쪽으로 대부분의 지역에서 5Φ이하의 고운 모래 또는 모래가 퇴적되어 있다고 보고하였다. 또한 퇴적층 깊이별로 210Pb(과잉 방사능)를 측정하여 퇴적속도를 추정한 결과, 하구언 상류에서의 퇴적속도는 0.34cm/yr이며 상부 퇴적층에 생물체 또는 물리적 요인에 의한 퇴적물 혼합층(Sediment mixing layer)이 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 하구언 남측 해역(백합등 상부 및 장림 서측해역)의 경우 0.25cm/yr로서 퇴적층 상부 약 3.5cm 까지 퇴적물이 혼합되어 있는 것으로 나타났다.

3. 삼각주 발달 원인 분석

3.1 하구역 삼각주 발달 주요 영향 요소

전술한 바와 같이 낙동강 하구역은 주변 환경의 기후, 강우, 하천유량, 유입토사 등에 의해 육역으로부터의 영향뿐만 아니라, 해역의 파랑 및 조석작용, 하구의 지형적 특징, 하구내부 수심조건, 주변연안의 개발여건 등에 따라서 하구역내 수괴의 거동이 다양하고 복잡해진다(유창일 등, 2006). 기존 연구자들의 낙동강 하구역 삼각주 발달에 영향을 미치는 주요 영향 요소들을 개략적으로 살펴보면 대체적으로 하구언 건설전·후의 해양물리환경변화, 퇴적지형 변화 등에 집중되어 있으며, 부분적으로 대기환경변화 및 삼각주 식물군락변화에 초점을 맞춘 연구결과가 보고된 바 있다.

3.1.1 하구언 건설과 해양물리환경변화

하구언 건설전의 경우, 낙동강 하상경사가 작은 관계로 창조시 삼랑진 부근까지 해수가 유입되고, 낙조시 현재 하구언 위치보다 상류에서 담수와 해수가 혼합되어 하강하는 양상을 보여 낙동강 유동의 주요인은 조석이며, 조석의 영향을 받은 감소하천(Tidal river)이었다. 또한 하구로부터의 염수쇄기(Saltwater wedge)의 길이는 소조기시 약 22km, 대조기시 약 16km로 추정하였으며, 염분의 영향범위는 소조기시 약 35km, 대조기시 약 45km로 추정하였다(류청로와 장선덕, 1979; 장선덕 등, 1981). 아울러 장선덕 등(1981)은 하구언 건설 전의 조석파의 전달, 하구밀도류의 상태 및 하천유량 변동에 따른 염수의 운동과 그 분포상태를 현장조사 자료를 통해 분석하였는데, 하구역의 표층과 저층간 염분차는 대조기시에는 1-3‰이지만 소조기시에는 7-15‰로서 비교적 예리한 염수쇄기를 보였다. 또한 대조기시 조류가 담수유출보다 우세하고 조석혼합이 왕성하여 염분은 크게 나타나지만 표층과 저층의 염분차는 비교적 작아서 연직적으로 균질한 염분분포를 보이지만 소조기시는 담수유출이 조류보다 우

세하여 염분은 대조기시에 비해 낮으나 표층과 저층의 염분차는 크게 나타나므로 예리한 염수쇄기를 형성하는 것으로 추정하였다. 염분최고값은 고조 약 1시간 후(최고상향류 3시간 후)에, 그리고 염분최저값은 저조 약 1시간 후(최고하향류 3시간 후)에 나타난다고 제안하였다.

하지만 하구언 건설후, 담수는 수문의 인위적인 개폐작용에 따라 방출되고 해수유입은 하구언에 의해 제한되어 수문을 열었을 때 담수와 해수는 급격히 만나 염수쇄기의 형태로 성층화되는 양상을 보임에 따라 하구언 수문의 개폐는 하구순환에 영향을 미치는 주된 요인 중의 하나가 되었다(김기철 등, 1999). 장성태와 김기철(2006)은 하구언 건설전·후의 특징을 살펴본 결과, 건설전에 비해 흐름이 약해졌고 조류가 흐름을 주도하던 혼합 기작이 담수의 방류가 주도하는 체계로 변화하였으며, 이러한 담수의 방류는 하천유량의 정도에 따라 낙동강 하구언 하류부 담수의 거동과 혼합 특성을 변화시켰으며 해수 순환에도 큰 영향을 주었다고 주장하였다. 또한 건설전 조석 간만 차에 의해 유출입되던 혼합 분기점은 대마등 아래지역이었으나 건설후 수문의 개폐에 의해 건설전에 비해 아래 지역인 신자도(새등)와 나무섬등 사이로 바뀌었다. 건설 후 수문이 인위적으로 개폐되는 관계로 완전히 혼합되지 않은 혼합수가 새등 아래 해역에서 패치(Patch) 형태로 출현하며 조류에 의해 창조시 가덕도 방향으로 편향한다고 주장하였다.

또한 하구언 건설 후 낙동강 하구지역의 사질 함량(Sand contents)이 연안 사주지역을 벗어난 지역까지 증가하였는데, 그 원인으로 니질 퇴적물 유입량 감소에 의한 사질토의 상대적인 증가, 담수 유출량의 현격한 감소로 수력학적 에너지 변화가 발생하여 이 지역의 조류 및 연안류에 의한 사질 퇴적물의 이동 등의 요인 때문에 발생한 것으로 생각된다(하정수, 2000). 또한 해안공학적 관점에서 지형변화원인 분석결과를 살펴보면 하구언 건설전의 경우에는 본류를 통해 유출된 토사가 해안에서 해수와 혼합되어 외해로 밀려 나갔으나, 하구언 건설 이후에 홍수시와 간조시의 유출수가 해수와 급격히 만나게 되어 해수의 혼합, 즉 완충작용 없이 외해로 밀려 나가게 되었고, 이는 만조시 다시 파랑의 작용으로 인하여 하구 지역으로 토사를 이동, 퇴적하는 양상을 나타내고 있다(Kim, 2005). 또한 김상호 등(2003)은 실제 지형변화와 수치 실험의 결과를 분석해 본 결과, 하구언의 건설과 같은 인위적인 요소 외에 해빈류의 영향이 크게 작용한다고 보고한 바 있다.

이상의 결과는 이종섭 등(1994)이 낙동강 하구 사주 변천은 과거에는 조석에 의한 조류 및 하천유량과 입사파랑의 작용이 평형을 이루었으나 수문설치로 인하여 조석의 영향이 크게 감소하고 오히려 파랑의 작용이 탁월한 하구지형의 형태로 변천되었다고 평가한 결과를 뒷받침하고 있다.

또한 한건모 등(1993)은 조석 주기의 유속과 염분 관측에 의해 낙동강 담수 플룸(Plume)에 대한 조석과 바람의 영향을 논하였는데, 낙동강 담수 플룸은 간헐적인 방출에 의해 연속적으로 그 구조를 유지하지 못하고 패치(Patch) 형태를 띤다고 하였다. 이후 김기철 등(1999)은 CTD 관측자료를 이용하여 낙동강 하구언 수문개폐에 따른 낙동강 하구언 하류부의 해양물리학적 환경의 변화를 유출수의 거동을 중심으로 조사하였다. 그

결과에 따르면 수문 완전개방시 하구언에서 주수로로 따라 낙조시 전형적인 담수플룸의 양상을, 창조시 전형적인 염수쇄기의 양상을 보인다고 주장하였으며, 새등 위쪽에서는 담수의 영향이 조시에 관계없이 지배적이며 담수플룸과 해수의 혼합은 새등 아래쪽에서 이루어진다고 보았다. 하구언 하류부의 순환 기작은 주수로 부분과 새등 아래의 2부분으로 크게 구분되며 주수로의 경우 조류의 영향보다 유출수의 영향이 지대하고 담수와 해수는 성층화되어 주수로로 따라 유하한다고 판단하였다. 이러한 밀도류의 발생메커니즘과 지형적인 영향으로 담수와 해수의 혼합수는 주수로로 따라 오르내림을 반복하는데 하류부의 경우 담수와 해수는 주로 낙조시 혼합되었으며 혼합된 후 외해로 빠져나가기 전에 창조류의 영향으로 재유입된다고 주장하였다. 이로 인해 유입된 토사나 생활하수 및 공업용수 등의 오염물질들이 완전히 외해로 빠져나가지 못하고 낙동강 하류부에 잔류하여 해양환경 오염을 가중시킬 수 있다고 예측하였다.

3.1.2 퇴적지형변화

낙동강 삼각주 퇴적의 구성물질이 되는 토사의 유입량을 정확히 추정할 연구결과는 찾아보기 힘들다, 반응부(1984)는 낙동강에 의하여 하구일대에 운반·퇴적되는 토사량은 약 400,000m³/year 정도이며, 해안표류사의 조수유출입구(Tidal inlet)를 통한 유입량은 2.8-6.3 × 10³m³/year라고 보았다. 이렇게 유입된 토사는 이유대와 김창원(1990)의 연구결과에 따르면 사주 퇴적물의 거동특성이 삼각주 지역별로 차이를 나타내는데 부유(Suspension), 도약(Saltation), 소류(Bed load) 상태로 운반되었으며, 조간대는 주로 부유와 도약으로, 수로의 퇴적물은 거의 소류와 약간의 부유 상태로 운반되며, 사주의 경우 강한 파

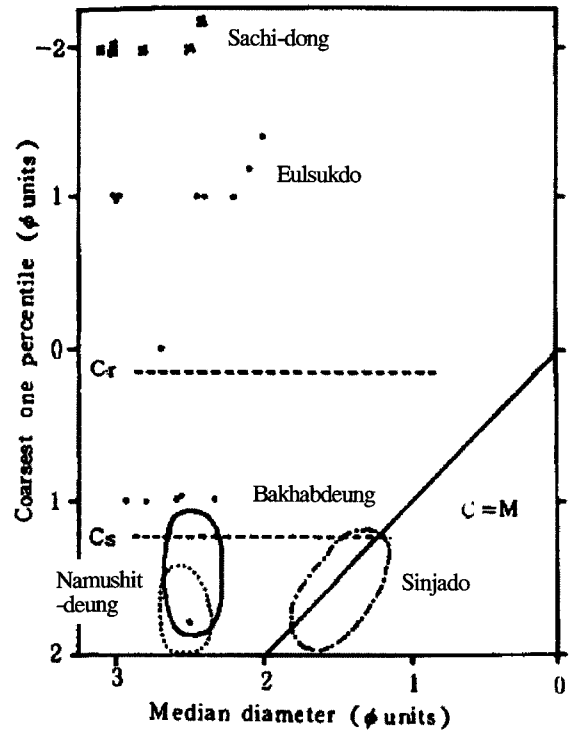


Fig. 6 CM diagram of the barrier island group in the Nakdong River Estuary (Ban, 1985)

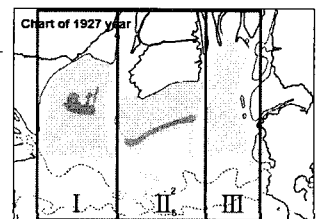
도의 영향을 받으며 그 후방에 위치한 조간대는 약한 조류의 영향을 받는다고 보고하였다. 이는 Fig. 6에서와 같이 Ban(1985)의 삼각주 지역별 퇴적물 입경분포 분석결과를 통해서 알 수 있는데 이를 통해 신흥리(사치동)의 경우 Rolling 을

Table 1 Estimated variation in the area of the barrier islands in the Nakdong River Estuary(Kim, 2005)

Division	Area(m ²)			Ratio of area(%)		Net-area(m ²)		Dir./Length of centroid(m)	
	(A) 1987yr	(B) 1996yr	(C) 2001yr	B/A	C/A	B-A	C-B	A-B	B-C
Jinnudo	805,376.2	818,725.7	926,208.3	+1	15	13,349.5	107,482.5	W/21.83	E/88.53
Jangjado	559,531.2	596,877.7	591,149.4	6	5	37,346.4	-5,728.2	W/7.93	W/35.03
Bakhabdeung	542,687.8	359,428.3	368,156.4	-34	-33	-183,259.4	8,728.1	NE/335.03	S/16.33
Sinjado	528,414.5	602,128.6	657,893.0	13	24	73,714.0	55,764.4	NW/522.77	NW/107.18
Daemadeung	297,526.1	346,395.9	209,636.6	16	30	48,869.8	-136,759.3	E/8.39	E/382.06
Doyodeung	0	114,053.9	313,992.3	0	175	114,053.9	199,938.4	SW/1327.22	NE/626.80
Total	2,733,535.8	2,837,610.1	3,067,036	1.04	1.12	104,074.3	229,425.9	NW/192.77	S/160.77

Table 2 Estimated annual area of the intertidal zone and sandy barrier islands(Yoo et al., 2006)

Year	Intertidal zone(km ²)				Sandy barrier island(km ²)				Total Sum (km ²)
	I	II	III	Sum	I	II	III	Sum	
1927	8.1	7.5	5.1	20.7	0.7	0.6	0.0	1.3	22.0
1963	7.5	7.4	5.0	19.9	1.3	0.6	0.0	1.9	21.8
1972	4.1	9.0	4.6	17.7	0.9	2.5	0.8	4.2	21.9
1983	4.5	8.2	3.3	16.0	0.8	2.3	0.8	3.9	19.9
1986	5.0	10.6	7.7	23.3	0.9	1.4	0.5	2.8	26.1
1995	3.8	10.4	7.0	21.2	0.9	1.1	0.6	2.6	23.8
Average				19.8				2.8	22.6



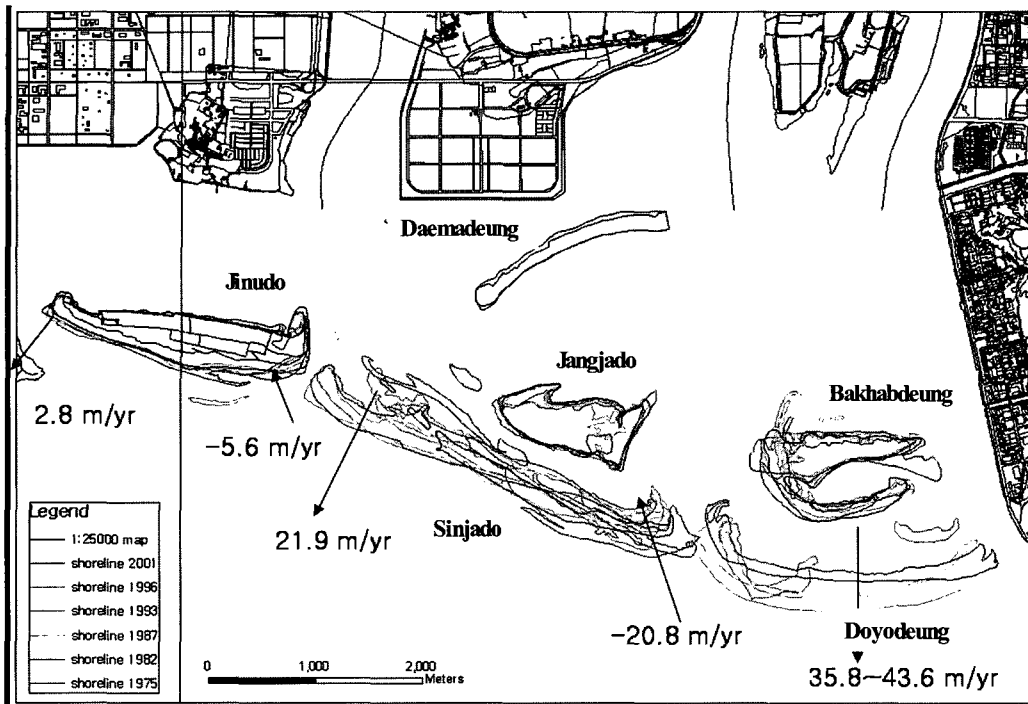


Fig. 7 Coastline variation of the barrier islands in the Nakdong River Estuary over the last 30 years(채장원, 2007)

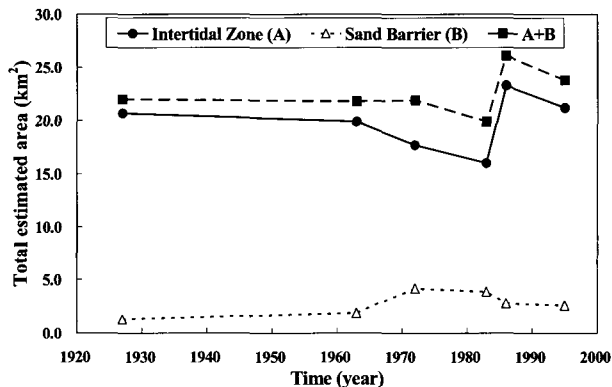


Fig. 8 Spatiotemporal change in the total areas of the intertidal zone and sand barriers in the Nakdong River Estuary

속도의 경우 Rolling 및 Saltation, 사주군에서는 Suspension으로 구분하였다.

낙동강 삼각주를 대상으로 지형학적 관점에서 분석한 Kim(2005)은 항공사진 측량기법을 이용하여 1987년, 1996년, 2001년의 해안선을 추출하고 연안사주의 면적 및 해안선의 변화, 기하학적 중심인 도심의 이동방향을 검토하였는데 그 결과에 따르면 Table 1과 같다. 2001년 백합등의 면적은 1987년 당시에 비해 0.67배로 감소하였고, 신자도의 경우 하구언 건설 이후에도 지속적으로 면적이 증가하여 1996년에는 1987년 당시보다 1.13배 면적이 증가하였으며, 2001년에는 1996년 당시보다 1.24배 면적이 증가하였고, 진우도, 대마등, 장자도는 면적변

화가 나타나지 않았다고 주장하였다. 또한 도심의 이동방향과 이동 크기는 우선 1987년에서 1996년 사이에는 신자도 서쪽 조수로 중심에서 퇴적체의 성장이 우세하였기 때문에 북서방향으로 이동하는 것으로 나타났고, 이후 2001년까지는 퇴적체의 성장이 가장 활발한 도요등이 남쪽 방향에 위치하기 때문에 남쪽으로 이동하는 결과를 나타내었다.

아울러 낙동강 하구역 사주 해안선 30년간 장기변화에 대해 최근 채장원(2007)은 Fig. 7과 같이 진우도, 신자도, 백합등, 도요등의 위치별 해안선 발달속도를 제시하였다. 그 결과에 따르면 진우도와 신자도의 서쪽 해안은 남쪽 방향으로 전진하지만 동쪽 해안은 북쪽 방향으로 후퇴하는 결과를, 백합등과 도요등은 남쪽 방향으로 전진하는 결과를 나타내었다.

최근 유창일 등(2006)은 Table 2와 같이 낙동강 하구역에 대한 1927년 이후 1995년까지의 총 6개의 수치해도를 사용하여 낙동강 하구역 사주간의 거리 및 조간대와 사주의 면적변화량을 산출하였는데, 그 결과에 따르면 진우도 전면에 Multibar의 형상을 가진 천퇴(Shoal, 또는 속등)가 과거로부터 발달하고 있었으며 연간 약 7.4m, 신자도 전면의 경우 연간 약 26.0m씩 외해방향으로 전진한다고 주장하였고, 낙동강 하구역 조간대와 사주를 합산한 면적은 평균 약 22.6km², 조간대의 평균면적은 약 19.8km², 사주 약 2.8km²인 것으로 산출하였다. 년도별 조간대와 사주의 면적 변화를 나타낸 Fig. 8을 살펴보면 1960년대 이후 급변하는 양상을 나타내고 있는데 낙동강 하구언 건설시기에 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

이인철 등(2007)은 낙동강 진우도를 대상으로 지형변화를 모니터링하여 수로 매몰 및 천퇴(Shoal) 발생은 대체로 춘계보다는 하계시(9월 및 10월)에 발달하며, 진우도 평균 퇴적속도는

약 0.85mm/day이며, 진우도 동측의 경우 약 1.32mm/day, 남측은 약 1.26mm/day로서 시·공간적으로 차이를 보이고 있음을 제시하였다. 또한 진우도 표층퇴적물의 평균입경은 0.18~0.26mm의 범위로서 신생 퇴적 사주의 경우 원 지반에 비해 상대적으로 큰 평균입경을 가지는 것으로 조사되었다.

김재중 등(1995)은 낙동강 유역은 건기와 우기의 구별이 뚜렷해서 낙동강 하구로 유입되는 유사의 대부분이 우기에 집중되며, 낙동강 하구엔 건설로 인해 진우도와 대마등 근처의 유속이 약해져서 우기시에 강 상류로부터 유입되는 부유사가 다 대포 연안지역 방향으로 수송되는 것으로 추측하였다.

3.1.3 대기환경 변화

전병일(2005)은 하구엔 건설전·후의 기상환경변화를 분석함으로써 하구엔 건설로 인한 대기환경 변화 요인으로 지표피복(Surface covered environment)의 전환을 제기하였는데, 이는 하구엔 건설이 인공호수를 형성하고 대기중에 수증기를 공급, 대기중 수분 및 열수지의 변화를 야기하여 강하류 지역의 기후변화를 초래한다고 보고한 바 있다.

3.1.4 삼각주 식물군락변화

일반적으로 낙동강 하구 습지생태계의 갈대군락과 세모고랭이군락 분포 면적의 증가는 토사를 퇴적시킴으로써 지형변화에 영향을 미치고 생물의 먹이와 서식처를 제공함으로써 생물다양성 보존에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이기철 등(1999)은 지리정보 시스템 및 원격탐사 기법을 이용하여 낙동강 하구 습지의 우점식물종인 갈대군락의 생산성에 근거한 습지생산력 지도 및 습지식생의 변화를 사전에 예측한 결과, 낙동강 하구 습지는 우점식물종인 갈대, 세모고랭이 및 혼합군락 등의 식생(Vegetation)이 있는 지역과 사빈과 간석지 등 식물이 없는 지역으로 구분될 수 있으며, 면적은 간석지(Tidal flat), 세모고랭이군락(*Scirpus trigueter* community), 갈대군락

(*Phragmites australis* community), 혼합군락(Mixed community), 사빈(Sand beach) 순으로 제시하였다. 또한 낙동강 하구역 식물군락은 사주 정선으로부터 간석지에 분포하는 세모고랭이군락, 사주의 자연제방 경계에 주로 분포하는 갈대군락, 사주의 내부에 분포하는 혼합군락으로 나누어지며, 사주 형성 시기가 오래됨에 따라 탈염에 의한 내륙화가 진행되고 있으나 하구엔 축조공사 초기보다는 종수가 감소하였다고 보고한 바 있다.

3.2 삼각주 변화의 예측기술 현황

낙동강 하구역에 분포하는 삼각주는 육상으로부터의 하천수와 해역으로부터의 조류 및 파랑에 의해서 발생되어지는 흐름의 상호작용에 의해서 퇴적토사의 거동 및 퇴적 현상이 발생하여 생성되어진다. 기존의 연구들은 대체로 Box형 모형을 적용한 낙동강 하구역의 물질수지 예측(홍석진 등, 2000; Yoon et al., 2005), 2차원 해수유동 수치실험을 통한 부유토사의 거동예측(김재중 등, 1995), 3차원 해수유동 수치실험을 통한 하천유출수 거동예측(주귀홍, 2002; 이종섭과 윤은찬, 2003; 이종섭 등, 2003; 노재영, 2004), 외해 파랑입사에 따른 해빈류의 수치실험(박상길과 최병섭, 1997) 등이 있으며, 이는 수괴의 구조를 분석하고 거동을 파악함으로써 간접적으로 퇴적토사의 거동을 예측하는 자료로서 활용될 수 있다. 그러나 직접적으로 퇴적물의 침식 및 퇴적을 재현한 예측기술을 도입한 지형변화 예측은 수행되어진 바 없으며 이를 재현하기 위한 많은 매개 변수들의 정립에도 미흡한 점이 많은 것이 현실이다.

홍석진 등(2000)은 낙동강 하구해역에서의 물질순환과 영양염 Flux의 특성을 파악하기 위해 단순박스 모델을 이용하여 담수 및 염분의 물질수지를 산정하였는데, 하구와 인근해역의 염분으로 산정한 수지에 의해, 모델영역으로 유입되는 담수의 교환량은 $0.94 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$, 해수교환량은 $2.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$, 담수의 체류시간은 2.03day이었다.

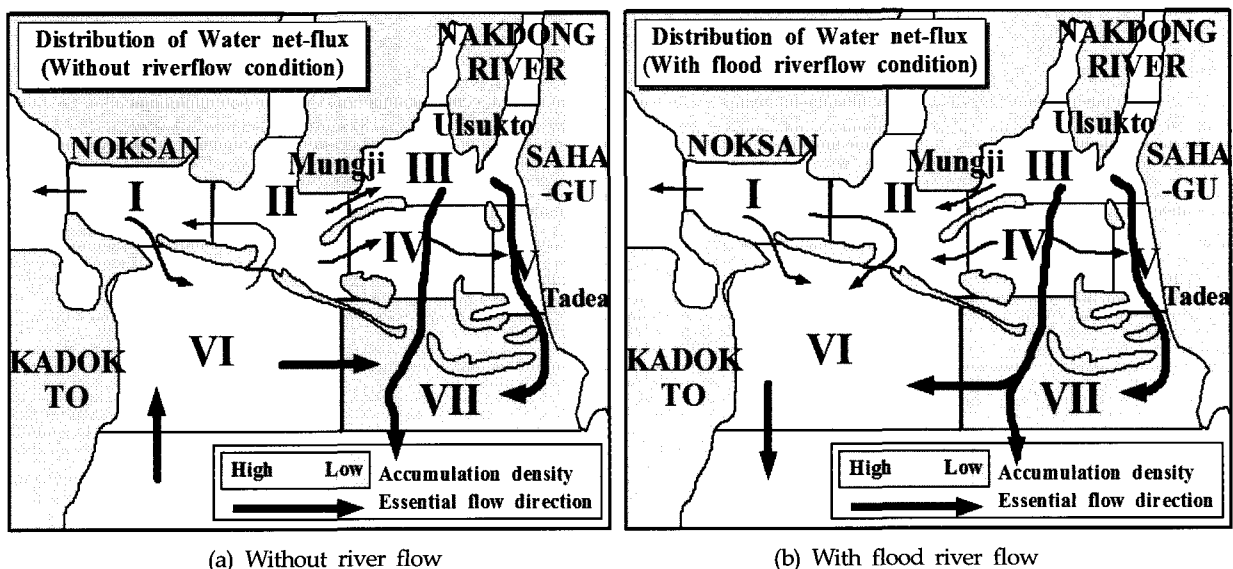


Fig. 9 Calculated essential flow direction and accumulation density for the net water flux(Yoon et al., 2005)

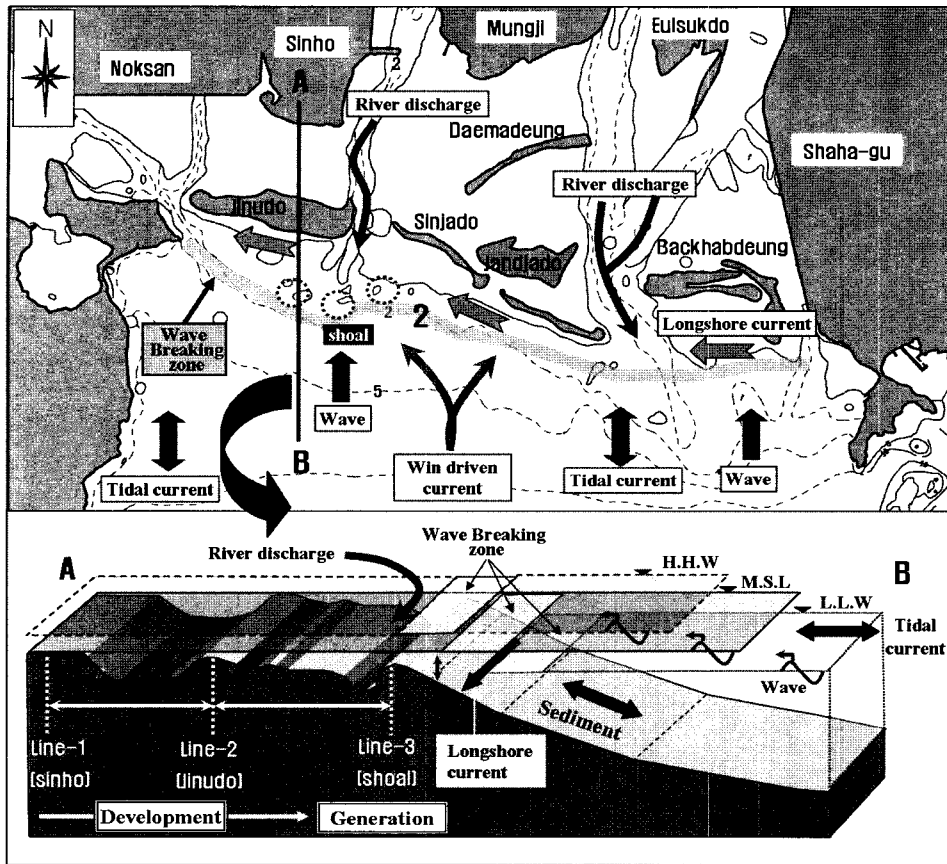


Fig. 10 Generation and development characteristics of shoal and barrier islands in the Nakdong River Estuary

또한 Yoon et al.(2005)는 낙동강 하구언 방류량(무방류시 및 홍수기시) 조건을 바탕으로 사주간의 단면유량Flux를 계산하였는데, 그 결과에 따르면 홍수 하천유량시 장자도, 백합등, 다대 전면해역에서, 평수기시의 경우 진우도 전면해역에서 물질수지가 가장 크게 나타나 이 해역에서 퇴적활동이 가장 활발할 것으로 예측하였다(Fig. 9).

아울러 이종섭과 윤은찬(2003), 이종섭 등(2003)은 평수기 낙동강 하천플룸의 3차원적 거동특성을 밝히기 위해 현지 관측된 CTD자료와 3차원 해수유동모델인 POM을 이용하여 낙동강 유출수의 확산에 대한 조석의 영향을 재현하고 거제도 복단에서는 낙조시에 저층의 고염수가 상승하는 연안용승과 같은 현상이 존재함과 아울러 낙동강 유출수가 진해만으로 유입되어 통영해안까지, 동쪽으로는 대면해역 부근까지 좁은 띠를 이루며 확장되고 있다고 보고하였다.

박상길과 최병섭(1997)은 낙동강 하구언의 하천유출수 유무 조건에 따른 해빈류 실험을 수행하고 낙동강 하구는 조차가 작고 평수시에는 하구언 유출유량보다 파에 의한 해빈류가 우세한 파랑(강세)유형의 하구임을 주장하였고, 이러한 하구에서는 파랑과 하천수 유출유량의 상대적인 크기가 하구주변부의 흐름 및 그것에 따른 퇴적에 의한 하구매몰이나 하구폐색과 같은 지형변화에 큰 영향을 미칠 것으로 주장하였다. 아울러 S10°W 계열 파향이 낙동강 하구의 해빈류와 표사의 이동에 큰 영향을

미칠 것이며, 하구역 지형으로 인하여 평수기시 하구 입구부에 강한 파랑에 의한 연안류가 모래를 퇴적시킴과 아울러 하구사주의 성장을 촉진시킬 것이라 추측하였다.

또한 유창일 등(2005)는 진우도 전면 사주의 발달 및 생성메커니즘을 위해 입사파랑과의 상호관련성을 고려하여 해양공학적인 관점에서 접근하여 분석하였는데 그 결과에 따르면 낙동강 하구 사주간의 거리를 심해입사파랑과의 파장으로 나눈 비의 값이 약 3에 분포함을 알 수 있었는데 이는 진우도 전면 사주의 발달 위치가 심해입사파랑의 파장의 대략 3배 정도의 거리에서 발달하고 있음을 나타낸다. 이와 같은 현상을 일으키는 외력과 낙동강 하구역의 사주 발생 기작을 정리하면 Fig. 10과 같이 요약할 수 있다(유창일, 2006). 또한 상류측에 위치한 하중도의 매립 및 해안선 변형 등의 개발후 약 10~15년이 경과된 후 남측 사주의 생성 및 발달을 초래하는 것으로 보았는데 이는 낙동강 하구언 건설후(1987년) 백합등 및 도요동의 생성(1990년), 녹산공단 매립건설 후(1995년) 진우도 전면 부정형적 사주 발달(2006년) 과정을 통해 확인할 수 있다고 주장하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 낙동강 하구역에 대해서 해양공학, 해안공학, 해양환경공학, 지형학, 지질학 등 다양한 학문 분야에서 수행되어진

기존 연구 결과를 수집·분석하여 현재까지 밝혀진 낙동강 하구역 삼각주의 발달 기구를 규명하고 향후 새로운 연구과제를 도출하기 위한 기초적 자료를 제공하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 하구역 및 삼각주의 일반적 개념을 정립하고 과거 100년간의 낙동강 하구역 삼각주의 변천사를 살펴보았으며, 삼각주를 구성하고 있는 하구퇴적층(Estuary deposit)의 기원 및 구성요소를 정리하였다. 아울러 이러한 삼각주 발달에 영향을 미치는 주요 영향 요소들을 살펴보고 현재까지 주요 연구자들에 의해 밝혀진 삼각주 발생 기작에 대한 연구결과를 정리하였다. 이상의 연구 결과중에서 낙동강 삼각주의 발달 및 생성 원인을 밝히기 위해 도출되어진 의미있는 결과를 중심으로 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 하구언 건설은 하구순환에 영향을 미치는 주된 요인 중의 하나이며, 해양물리환경, 퇴적지형, 대기환경 및 삼각주 식물군락 변화를 초래하였으며 이러한 변화요인들이 또다시 반복적으로 하구순환에 영향을 미쳐 지속적으로 하구 삼각주의 변화를 초래하는 것으로 판단된다.

(2) 낙동강 남단 부정형적 사주의 발달 위치는 기존 해안선으로부터 심해입사파장의 약 3배 정도 이격거리에서 발달하고 있으며, 이는 상류측에 위치한 하중도 매립 및 해안선 변형 등의 개발후 약 10~15년이 경과된 후 형성되는 부산물이다.

(3) 하구 퇴적물의 침식 및 퇴적을 재현한 예측기술을 도입한 지형변화 예측기술의 개발이 필요하며 이를 재현하기 위한 많은 매개 변수들의 정립을 위해 지속적인 현장 모니터링이 요구되어진다.

(4) 기존의 연구 결과는 전체적인 낙동강 하구역의 지형변화 규모 및 시간변화에 따른 발달 특성을 명확하게 규명하였다고 보기는 어려우나 향후 하구 삼각주의 발달과정을 더욱 명확히 파악하기 위해서는 다양한 분야별 통합연구체계의 구축이 필요하다고 판단되어진다.

후 기

본 연구는 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-331-D00700) 결과이며, 연구비 지원에 감사드립니다. 본 연구에 참여한 유창일은 [2단계 BK21사업]의 지원비를 받았음.

참 고 문 헌

김기철, 양한섭, 김차점, 문창호, 장성태 (1999). "수문개폐에 따른 낙동강 하구언 하류부의 해양물리환경변화", 한국해양환경공학회지, 제2권, 제2호, pp 49-59.

김기현, 조진형, 박남준 (2000). "낙동강 하구역 퇴적물 중금속의 분포와 오염의 역사 추정", 한국해양학회지 바다, 제5권, 제4호, pp 285-294.

김상호, 신승호, 양상용, 이중우 (2003). "낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구", 한국해양환경공학회지, 제6권, 제3호, pp 26-36.

김석윤, 하정수 (2001). "낙동강 하구와 주변 연안역의 표층 퇴적상 및 퇴적환경 변화", 한국수산학회지, 제34권, 제3호, pp 268-278.

김원형, 이형호 (1980). "낙동강 하구지역의 퇴적물 운반 및 퇴적에 대한 고찰", 지질학회지, 16권 pp 180-188.

김재중, 김기철, 이정만 (1995). "낙동강 하구에서의 부유사 거동에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제9권, 제1호, pp 120-131.

권혁재 (1973). "낙동강 삼각주의 지형연구", 지리학, 제8호, pp 8-23.

노재영 (2004). 낙동강 유출수의 Plume 거동에 관한 수치적 연구, 부경대학교 석사학위논문.

류청로, 장선덕 (1979). "낙동강 하구의 조석과 유동", 한국해양학회지, 제14권, 제2호, pp 71-77.

류준길 (2003). 낙동강 하구 일원에 분포하는 홀로세 해성 점토질 퇴적층의 토목지질학적 특성, 부산대학교 박사학위논문, 230p.

박상길, 최병섭 (1997). "대하천 하구의 해빈류와 하구지형변이 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제17권, 제II-1호, pp 77-88.

반용부 (1984). "낙동강 하구의 간석지", 지리학연구, 제9권, pp 537-559.

반용부 (1986). 낙동강 삼각주의 지형과 표층 퇴적물 분석, 경희대학교 박사학위논문, pp 115.

반용부 (1995). "낙동강 하구 연안사주 지형의 변화", 부산여자대학교논문집, 제40권, pp 155-195.

부산광역시 (2004). 낙동강 하구 생태계모니터링, pp 9-19, pp 41-50.

부산광역시 강서구청 (2004). 낙동강 하구 오염해역 및 소형선 통항로 확보 준설연구용역 보고서.

서준철, 박경 (2006). "지형을 고려한 해안습지 분류", 지리학연구, 제40권, 제3호, pp 339-351.

유창일 (2006). 낙동강 하구역 사주의 생성과 발달 특성에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문.

유창일, 윤한삼, 류청로 (2005). "낙동강 하구의 진우도 사주 생성 및 발달에 관한 연구", 한국해양공학회 추계학술대회, pp 153-158.

유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006). "해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화", 한국해양공학회지, 제20권, 제6호, pp 54-60.

윤한삼, 이인철, 류청로 (2005). "낙동강 하구역내 사주간의 단면유량플럭스 수치모의", 한국해양환경공학회지, 제8권, 제4호, pp 186-192.

이기철, 윤혜순, 김승환, 남춘희, 옥진아 (1999). "GIS와 원격탐사를 이용한 낙동강 하구 습지 데이터베이스 구축에 관한 연구", 한국지리정보학회지, 제2권, 제3호, pp 1-15.

오건환 (2001). 낙동강 하구 갯벌: 지형, 한국의 갯벌: 환경, 생물 그리고 인간, 서울대 출판부, pp 505-519.

이유대, 김창원 (1990). "낙동강 하구역 퇴적환경연구: 퇴적작

- 용 및 증금속 분포”, 한국해양학회지, 제25권, 제4호, pp 182-188.
- 이원환 (1975). “한국하구특성의 지형학적 연구”, 대한토목학회지, 제23권, 제4호, pp 111-119.
- 이인철, 유창일, 윤한삼 (2007). “낙동강 부정형적 사주발달과 환경인자간의 상관성 비교 연구”, 한국해양환경공학회지, 제10권 제1호 pp 13-20.
- 이종섭, 김가야, 박일흠, 주귀홍 (1994). “낙동강 하구둑 건설 후의 하구사주 변이과정”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 171-174.
- 이종섭, 윤은찬 (2003). “낙동강 하천플룸의 3차원 혼합거동해석”, 대한토목학회, 제23권, 제4B호, pp 347-358.
- 이종섭, 윤은찬, 백승우, 이재철 (2003). “홍수기 낙동강 하천 플룸의 3차원 거동해석”, 한국수산학회지, 제36권, 제5호, pp 549-561.
- 장석덕, 류청로, 이문옥, 이재철 (1981). “낙동강 하구의 염수 운동”, 한국해양학회지, 제16권, 제1호, pp 31-37.
- 장성태, 김기철 (2006). “낙동강 하구에서의 해양 환경 변화”, 한국해양학회지 바다, 제11권, 제1호, pp 11-20.
- 전병일 (2005). “낙동강 하구언 건설 전·후의 기상환경 변화 특성”, 환경영향평가, 제14권, 제3호, pp 135-145.
- 주귀홍 (2002). 낙동강 하천유출수의 3차원 거동 해석, 부경대학교 박사학위논문.
- 채장원 (2007). “신항만과 낙동강 하구역-부산항 신항만 개발에 따른 해양수리현상 변화”, 부경대 FOID2007 학술심포지움 자료집, pp 13-33.
- 하정수 (2000). 낙동강 하구와 주변 연안역 퇴적물의 특성 및 퇴적환경, 부경대학교 석사학위논문.
- 한건모, 김기철, 김재중 (1993). “명지늪산 해역 매립 후의 해수유동에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제7권, 제1호, pp 441-454.
- 홍석진, 이대인, 김동명, 박청길 (2000). “낙동강 하구해역에서의 단순 박스모델에 의한 물질수지”, 한국해양환경공학회지, 제3권, 제3호, pp 50-57.
- Ban, Y.B. (1985). “Sediment Grain Size Distribution of the Nakdong-River Delta”, Geographical Journal of Korea, Vol 10, pp 713-747 (in Korean).
- Barrell, J. (1912). “Criteria for Recognition of Ancient Delta Deposits”, Bull. Geol. Soc. Amer., Vol 23, pp 377-446.
- Davis, T.J. (1994). The Ramsar Convention manual-A Guide to the Convention on Wetland of Importance Especially as Waterfowl Habitat, Ramsar Convention Bureau.
- Eun, G.Y.N., Chung, C.H. and Kim, D.J. (1998). “A Comparative Study of Depositional Environments through Coring Analysis in Yeongsan and Nakdong Estuaries”, J. of the Korean Environmental Science Society, 7(6), pp 889-893 (in Korean).
- Garvine, R.W. (1977). “Observations of the Motion Field of the Connecticut River Plume”, J. Geophys. Res., Vol 82, pp 441-454.
- Hayes, D.F., Olin, T.J. and Fischenich, J.C. (2000). Wetlands Engineering Handbook, US Army Corps of Engineers, ERDC/EL TR-02-21.
- Kim, H.M. (1988). “Assessment of Tectonic and Depositional Environments of Nakdong Delta, Korea”, J. Korean Earth Science Society, Vol 9, No 1, pp 45-69 (in Korean).
- Kim, S.H. (2005). “The Morphological Changes of Deltaic Barrier Islands in the Nakdong River Estuary after the Construction of River Barrage”, J. Korean Geographical Society, Vol 40, No 4, pp 416-427 (in Korean).
- Lee, Y.D. (1993). “A Study on the Characteristics of Submarine Geology in Pusan Bay: Sedimentation Process in the Nakdong River Estuary, Korea”, J. Korean Earth Science Society, Vol 14, No 1, pp 67-74.
- Lee, S.K, Hwang, J.Y., Kim J.S. and Um, J.G. (2005). “Correlation Between Engineering Properties and Mineralogy of Clay Sediments in the Estuary of the Nakdong River”, J. Miner. Soc. Korea, Vol 18, No 2, pp 93-107 (in Korean).
- Perillo, G.M.E. (1995). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, Elsevier, Amsterdam.
- Reineck, H.E. and Singh, I.B. (1980). Depositional Sedimentary Environments, Springer-Verlag, pp 549.
- Shepard, F.P. and Inman, D.L. (1950). “Nearshore Circulation Related to Bottom Topography and Wave Refraction”, Trans. Am. Geophys. Union, Vol 34, No 4, pp 555-565.
- Traverse, A. (1988). Paleopalynology, Unwin-Hyman, P.600.
- Yoon, H.S., Lee, I.C. and Ryu, C.R. (2005). “Numerical Simulation for Net-water Flux of the Cross-sectional area in the Nakdong River Estuary”, J. Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol 8, No 4, pp 186-192 (in Korean).

2006년 2월 28일 원고 접수

2007년 4월 9일 최종 수정본 채택