

한강하구에서 하도변화와 식물천이의 상호작용에 따른 습지형성 기작

이삼희*·윤석준**†

*한국건설기술연구원, 수자원하천연구본부, 선임연구위원

**한국건설기술연구원, 수자원하천연구본부, 연구원

Mechanism of Wetland Formation according to Interaction of River Bed Fluctuation and Plant Success in the Hangang River Estuary

Samhee Lee*·Sukzun Youn**†

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Hydro Science and Engineering Research, Senior Research Fellow

**Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Hydro Science and Engineering Research, Researcher, Corresponding Author

(Received : 24 October 2022, Revised : 21 November 2022, Accepted : 21 November 2022)

요약

하구둑과 같은 횡단구조물이 없는 자연 하구인 한강하구는 바다와 하천을 연결하는 생태통로로서 생물종 다양성이 풍부하여 생태 가치가 높다. 한강하구에서는 유사분급이 입체적으로 다양하게 분포하여 기후변화 및 하천개발 등과 같은 여러 변화 요인에 따라 하상구조가 민감하게 변하는 특성이 나타난다. 이러한 현상은 하도육역화와 하도복단면 발달의 원인이 된다. 국가습지보호지역으로 지정된 장항습지에서는 하도 지형변화에 따라 식물천이가 현저하다. 본 연구 목적은 이에 대한 현장 조사를 실시하여 습지형성 기작을 규명하는 데 있다. 조사연구 결과, 인위적으로 조성된 것으로 추정되는 초기의 장항습지가 이후 성장하는 과정에 유량에 따른 하도 미지형 변화와 식물천이 사이에 상호 밀접하게 작용하는 것으로 드러났다. 즉 하상의 주재료(모래)가 아닌 부재(Sub-materials of river bed)인 점성의 표층 하상재료(위시로드 성질의 미세립사)가 선구식물(새섬매자기 등)에 포집되면서 복단면 형태(습지)로 성장하는 데 매개 역할을 한 것으로 나타났다. 습지가 하도복단면 형태로 발달한 후에는 선구식물이 다른 식물종으로 천이되는 양상도 나타났다.

핵심용어 : 한강하구, 하도육역화, 사주, 하도복단면, 장항습지, 식물천이, 위시로드

Abstract

The Hangang river estuary, which is a natural estuary without structures such as estuary barrage, is an ecological pathway connecting the sea and rivers. Accordingly, Hangang river estuary has various species, and there is very valuable. Sediment classification in Hangang river estuary is three-dimensionally and diversely distributed. Sediment classification in Hangang river estuary is also sensitively changed according to various factors such as climate change and river development. It is typically cause to landform and to develop a compound cross section. In Janghang wetland, the plant success is remarkable according to the morphological change at river bed. The purpose of this study is to identify the mechanism of wetland formation based on the observation on-site. As a result of the observation, Janghang wetland where was artificially created, has been grown according to the river bed change based on the flow rate and the plant success. The viscous surface layer material(fine grains of wash rod properties), which is not the main material(sand) of the river bed, but sub-materials of river bed, has been settled on the pioneer plants(bolboschoenus planiculmis, etc.). It is an important role in the growth of a compound cross section and a wetland. After the wetland developed to the compound cross section, it is observed that the pioneer plants are transferred to other plant species.

Key words : Han river estuary, Landform of river channel, Sand bar, Compound cross section, Janghang wetland, Plant success, Wash road

†To whom correspondence should be addressed.

Department of Green Smart, Graduate School, Sang Myung University, Professor.

E-mail: sukzunyoun@kict.re.kr

• Samhee Lee Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Hydro Science and Engineering Research, Senior Research Fellow(samhee.lee@kict.re.kr)

• Sukzun Youn Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Hydro Science and Engineering Research, Researcher (sukzunyoun@kict.re.kr)

1. 서 론

한강하구(Fig. 1)는 상당 구간이 남북경계 구역에 놓여 있고 정전협정에 의거 ‘한강 공동이용 구역’으로 설정된 중립지구에 해당한다. 이런 연유로 수자원 확보를 목적으로 하는 하구둑이 없어 황해 바다와 자연스럽게 연결되어 있다. 바다와 하천을 연결하는 생태통로로서의 역할도 하므로 생물종 다양성이 풍부하여 생태 가치가 높은 생물서식 공간이기도 하다. 이곳에서는 조수간만의 차에 따른 조류와 한강·임진강·예성강의 하천흐름이 만나기 때문에 복잡한 흐름(Complex flow)이 나타난다. 이에 따라 한강하구에서는 복잡한 흐름, 유사와 표사의 거동 혼재에 기인한 하상재료의 입체적 분급 현상, 사주의 활발한 이동 등이 나타나서 분석에 어려움이 있다.

그 대표적인 특징으로써 과거 수역(水域)이던 곳이 육역(陸域)으로 바뀌면서 하도복단면 형태로 발달해 점차 수립대가 형성되는, 이른바 하도육역화 현상을 들 수 있다. 한강하구의 하도육역화 지역을 장항습지(고양시), 산남습지(파주시~고양시), 시암습지 등으로 환경부에서 2006년에 명명하면서 국가습지보호지역으로 지정해 관리하고 있다. 이 가운데 장항습지에서는 활발한 하도 지형변화에 따라 식물원이 현상이 현저하게 나타나고 있다.

공학적인 분석방법인 하상변동 해석에서는 하도형태를 지배하는 하상의 주재료(main materials of river bed)을 주로 대상으로 삼는다. 본 연구에서는 하상의 부재료(sub-materials)로써 점성을 지닌 미세립사의 표층 하상재료(silty wash load)가 새섬매자기와 같은 선구식물(pioneer plant) 및 수변식물과 어떻게 상호 작용을 하는지에 주목하였다. 이를 통해 하상지형이 고수부지와 같은 복단면 형태(compound cross section)의 습지로 성장하는 과정을 살펴보고, 습지의 물리기반 특성이 바뀌는 상황에 선구식물이 다른 식물종으로 천이되는 양상도 관찰하였다. 관련 문헌과 지속적인 현장 추적 조사를 실시한 결과를 토대로 분석하였

다(U.S Army Engineer Research and Development Center, 2021).

2. 한강하구 하도특성 분석

2.1 하도 개황과 수문 특성

한강은 지형적으로 연안의 연장선에 있는 유도의 측선 폭(약 3.1 km)을 하천관리에서 필요한 기준선으로 삼아 유역면적은 35,770.4 km²(북한 지역을 제외한 유역면적은 25,953.6 km²), 유로연장은 494.4 km, 설계홍수량은 37,000 m³/s이다. 임진강은 한강수계 제1지류로서 경기 파주 오두산 근방에서 한강으로 유입하며 유역면적은 8,138.9 km²(군사분계선을 기준으로 할 때는 남한지역의 유역면적이 3,185.6 km²), 유로연장은 273.5 km, 한강합류점 기준으로 하구 폭은 2.1 km, 설계홍수량은 17,210 m³/s이다. 서해로 개방된 한강하구는 조석의 영향을 크게 받으며 하상경사는 약 1:7000이다.

분석에는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 유량자료를 사용하였으며 결측 구간에 일수위 자료가 있을 때는 일평균수위를 수위-유량 관계곡선식에 적용하여 산출한 후 사용하였다. 전류리나 행주대교에서 관측한 수위는 조석의 영향으로 하천 유량만을 산정하는 데 적합하지 않으므로 상류에서 유입하는 유량은 한강(한강대교 지점) 유량과 안양천(오금교 지점) 유량을 합산하여 산출하였다. 한강대교의 2011년부터 2020년까지 월별최대유량을 분석한 결과 하천 고수부지(산남습지 기준)까지 잠기는 유량인 지배유량은 9,910 m³/sec로 산출되었다. 2003년부터 2011년까지는 하안변화에 영향을 줄 정도의 유출이 거의 매년 있었으나, 2011년 7월 홍수 이후부터 2020년 8월 홍수 사이 19년 동안에는 저수로 내 중규모 하상파(사주)를 이동시킬 정도 외에 습지가 잠길 정도의 출수는 발생하지 않았다. 다만 2006년 홍수 때는 장항습지가 완전 침수해



Fig. 1. The location of Hangang river estuary and national wetland

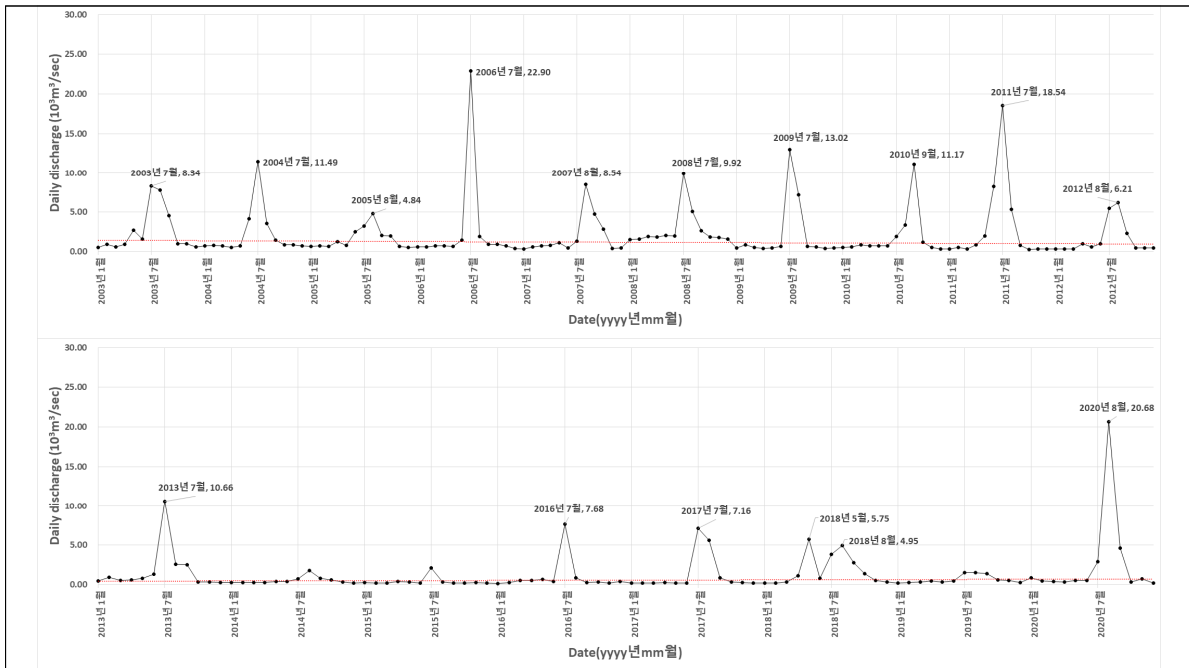


Fig. 2. The sum of annual maximum flow rate at Hangang river(Hangang Bridge) and Ahnyang river(Ohguem Bridge) (2003~2020) (WAMIS, 2021)

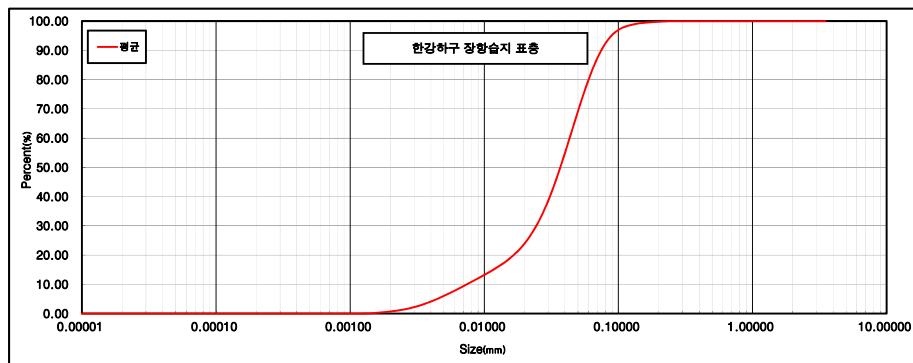


Fig. 3. The bed surface material at the habitat of pioneer plants around riverbank of Janghang wetland(ASCE, 2008; Yamamoto, 2018)

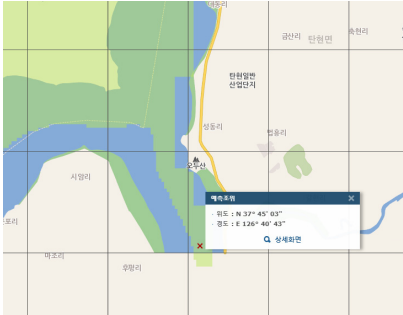
버드나무류의 수관이 2/3 정도까지 잠기고 습지 내 경작지 논두렁이 무너져 유실되었으며 고라니 76두가 군작전로로 대피한 상황을 현장 조사를 통해 확인하였다. 이를 계기로 무너진 논두렁 복구의 일환으로 논두렁을 더 높이 쌓는 작업이 광범위하게 행해졌다.

2.2 유사분급과 유사입경

한강하구 하상재료는 평면 및 종횡단적으로 입경이 다양하게 분포되어 있는 특이한 양상을 나타낸다. 장항습지 인근 저수로의 기저층 하상재료(대표입경에 해당)는 가는 모래인 0.251~0.259 mm이다. 인근 산남습지에서도 거의 유사한 0.25 mm(D_{50})로 분석되었다. 장항습지 저수로 유심부에서는 기저층 하상재료 입경(D_{50})이 1.15 mm인 왕모래도 나타나기도 한다. 한편 장항습지 하안선이 성장하면서 선구식물인 새섬매자기군락지 내 표층 하상재료는 대표입

경(D_{50})이 0.04 mm이다. 인근의 저수로 내에 존재하는 형제섬(일명 박도)의 암반 위에 덮여 있는 시료를 분석한 결과 0.08 mm로 확인되었다. 즉 장항습지 하안 어깨부와 형제섬의 하상재료가 거의 동일하게 위시로드 성격의 실트질 미세립사인 것으로 나타났다. 또한 2005년에 이루어진 장항습지 층구조 조사 결과 갈대와 버드나무류군락 경계부의 표층하상재료의 대표입경도 0.03~0.04 mm이었다. 결국 한강하구의 저수로 하상에서는 모래질 하상재료로, 저수로 하안부 및 장항습지 표층에서는 실트질 미세립사가 표토층 재료로 확연히 구분된다. 실트질 미세립사는 바다로 유출되는 확산형 위시로드로 취급되어 하천관리에 요구되는 하상변동 해석에서는 대개 배제된다. 그런데 한강하구 장항습지의 수변 선구식물 군락지에 실트질 미세립사의 존재는 식생의 영향으로 실트질 미세립사의 퇴적이 이루어지는 증거 중 하나로 하천지형 변화를 예측하는 데 중요한 인자로 작

Table 1. Location of prediction point and tidal constituents

 예측 조위 위치	분조명	진폭(cm)	지각g(deg)
	M2(주태음반일주조)	158.78	217.79
	S2(주태양반일주조)	50.55	284.62
	K1(일월합성일주조)	24.09	343.29
	O1(주태음일주조)	17.99	290.23

용한다는 것을 의미한다.

2.3 부유사 거동 분석

한강하구 전류리 관측소 부근 어로한계선 인근에 2006년과 2007년에 부유사 관측기 2기를 설치하여 관측한 결과를 활용하였다. 관측은 2006년도에 3개월간 2개 지점에서, 2007년도에 5개월간 2개 지점에서 수행하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008). 탁도 관측 자료와 하천측량 결과를 바탕으로 한강하구의 부유사 수지와 저수로 하상변동 특성에 대해 분석한 바 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008). 이에 따르면 부유사 플럭스는 산남습지 인근의 예측조위를 분석한 결과에 따르면 창조기에 강한 유속의 영향으로 낙조기에 비해 탁월하다(Table 1 참조). 그런데 3 시간에 걸친 밀물 때와 9 시간에 걸친 썰물 때 이동한 부유사의 양은 지속시간 문제로 낙조기의 유출량이 약간 더 큰 경향을 보인다. 그래서 순부유사 누가량은 전체 유입량과 유출량의 약 16 % 정도로 낙조기 유출이 밀물 때 창조기 유입보다 다소 많다는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 부유사의 수직 분포는 관측하지 않았지만, 일산대교 건설공사 현장에서 채취한 하상의 매트릭스(실트질의 미세립사로서 위시로드에 해당) 입경과 마찰속도를 바탕으로 부유사 거동을 분석한 결과 창조기에는 완전혼합이 이루어지고 있는 것으로 추정할 수 있었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013). 비홍수기에 미세립사는 낙조기에도 유출되는데 저수로 수

변에 쌓이는 이유는 흐름 차이에 따른 국지 퇴적과 함께 수변 표층에 이입되는 선구식물과 관계가 있을 것으로 판단된다(Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 2019).

한편, 저수로에 분포한 주 하상재료(main materials of river bed)를 대상으로 2009년부터 2010년까지 한강 하구 신곡수중보 하류에서 하상변동 조사를 실시하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020). 조사 결과 총 누적 하상변동량과 그 시기를 홍수 발생 시기와 비교해보면, 한강하구 관측구간의 하상변동 경향은 매년 발생하는 홍수로 저수로 하상이 세굴되고 홍수가 없는 비홍수기에는 조석 작용으로 말미암아 도로 매워지는 현상을 확인할 수 있었다. 저수로 하상변동은 비홍수기에는 퇴적 경향을 나타낸다. 한강 기수역에서는 부유사의 수지와 저수로 하상변동량을 살펴볼 때 유출되는 부유사의 순누가량이 유입되는 양보다 많지만 결국 저수로 하상변동은 하상재료의 소류거동에 따라 지배된다는 사실을 알 수 있다.

3. 하도변화와 식물천이에 관한 상호작용 추적

3.1 장항습지 하도변화 특성 조사

3.1.1 장항습지 하도구간에서 사주 평면변화 이력

사주 형태는 유사 거동에 따라 크게 대규모, 중규모, 소규모 하상파로 나눈다. 이 가운데 본 연구에서는 횡단과 종단

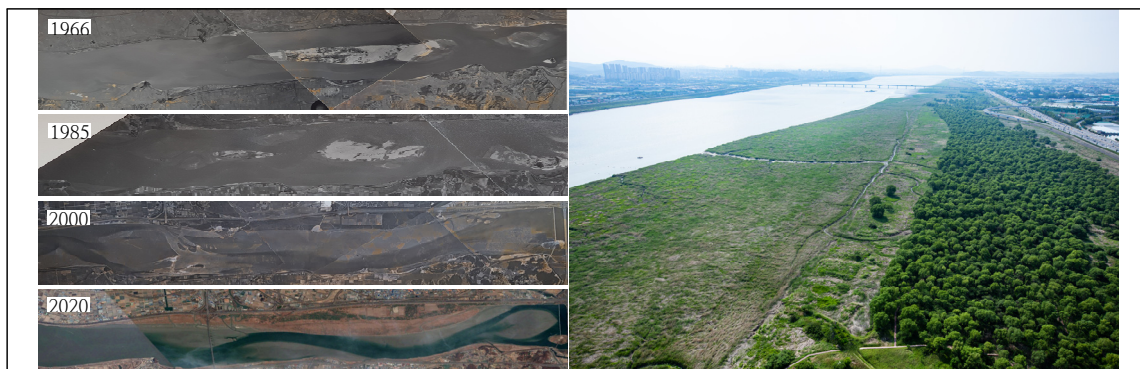


Fig. 4. The plan view of Janghang wetland in Hangang river estuary(National geographic information institute, Google earth, Goyang city, 2020)

방향으로 이동하면서 하도형태를 결정하는 중규모 하상파에서 드러나는 사주에 주목하였다. 통상 모래톱이라고도 하는 중규모 하상파는 항공사진과 Google earth(2020)의 위성사진(Fig. 4)을 활용하여 분석하였으며 시간 경과에 따라 지형 변화가 활발한 것을 알 수 있다.

2006년 국가습지보호지역으로 지정된 장항습지 인근 하도에서는 1966년 항공사진에서 보면 하도 협착부(행주산성~백마도~김포고촌)의 직하류에 나타난 하중도(제주초도)의 영향으로 분파 흐름이 형성된 것으로 나타난다. 이에 따라 장항습지의 위치는 지배유량 규모에서는 과거 수충부에 해당하며, 장항습지와 같은 사주가 없던 저수이였다. 제주초도 인근 하도에서는 한강종합개발사업(1982년~1986년)의 일환으로 준설에 의한 하도정비가 이루어지고, 신곡수중보 축조와 일산 신도시 건설에 따른 하상 준설도 동시에 행해졌다. 이후 1990년 장항습지 상류단 부근의 일산제가 붕괴한 후 제방을 확장하는 복구사업을 거치면서 2000년도 위성사진에서는 하중도의 모습은 완전히 사라졌다. 2000년 현장 조사에서 하중도 바로 우안 제방 쪽에서는 저수로 하상으로 부터 표고차 5~6 m 정도의 고수부지 모습을 확인할 수 있다. 현장 조사 사진에서 고수부지 내에 농수로와 논두렁으로 둘러싸인 경작지가 인위적으로 조성된 것을 확인하였다. 장항습지는 식물의 나이테 분석을 활용하여 분석한 결과 1999년 대홍수로 고수부지 침수 직후부터 버드나무류의 유묘가 일제히 활착한 사실을 확인하였으며, 2006년 홍수 시 무너진 경작지 논두렁의 논두렁 높이를 올리는 등 여러 요인이 중첩하면서 현재까지 평면적, 수직적으로 성장하고 있다.

최근 들어 장항습지 면적이 2008년에 약 2.0 km²에서 2018년에는 5.0 km²로 급하게 커져 과거의 제주초도 면적을 훌쩍 넘어서는 상황이다. 심지어 장항IC 인근 측선에서는 2016년에 저수로이었던 곳이 2018년에는 약 300 m 정도의 폭으로 고수부지화 된 하도복단면 형태로 발달하였다. 2020년에 이르러서는 하폭 절반 정도까지로 확장되었다(Fig. 4). 최근에는 확장된 구역에서 하도육역화의 지표종인 산조풀이 목격되었으며 일부 목본류의 유묘도 산발적으로 나타났다.

3.1.2 저수로 하상파 거동과 식생 피복된 사주의 성장

성장 일로에 있는 장항습지에서 저수로의 하상파 거동과 하안선 변화에 대한 조사는 신곡수중보 직하류 부근에서 일산대교 하류부까지 약 8 km 구간을 대상으로 삼았다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 1985년 하도정비 차원에서 이루어지던 하중도 준설로 수역이던 곳에 2000년에 나타난 장항습지의 초기 형태는 현재까지 목본류로 피복된 형상을 유지하고 있다. 그런데 저수로의 하상파는 최대유심선(thalweg, 최심하상고와 동일한 개념으로 간주)을 따라 분포하며 고수부지가 완전히 침수한 2006년의 홍수(홍수량 : 22,900 m³/s)가 발생한 이후 2013년까지 현재와 비교해 다소 폭이 넓게 나타난 것을 볼 수 있다. 즉 2013년 7월까지의 활발한 저수로 하상변화를 유도하는 지배유량 9,910 m³/s 이상의 유출은 거의 매년 발생했다. 2013년 이후 장항습지가 잠긴 2020년 7월 21,170 m³/s의 유출이 발생하기까지는 장항습지가 전부 잠길 정도의 유출은 없었다. 이로 인해 최대유심선을 따라 분포하는 저수로 하상파의 폭이 좁아졌으며 최근에는 저수로 사행 양상도 나타났다. 최대유심선을 따라 하상재료 입경은 상대적으로 굵어 골재로써 가치가 높다. 이에 따라 제주초도 준설 이후 여러 해에 걸쳐 골재 채취가 이루어진 영향도 어느 정도 있었을 것으로 추정된다. 이런 가운데 저수로 내에서는 중규모 하상파 형상의 사주가 우안, 즉 일산대교 복단에서 우안 제방을 따라 종방향으로 뚜렷하게 나타나기 시작했다. 2015년에는 나대지 사주이던 곳이 점차 식생으로 피복된 사주로 진행되어 종횡단으로 확장하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 저수로 사주 성장구간의 하도변화와 식물천이 조사

3.2.1 장항습지의 하안선 변화

장항습지에서는 특이한 하안선 변화가 확인되었다. 하안선 변화에 대해 2003년부터 2019까지 추적하여 이미지화한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 2003년에 비해 2008년의 하안선이 장항습지 중상류 측에서는 변화가 거의 없지만 하

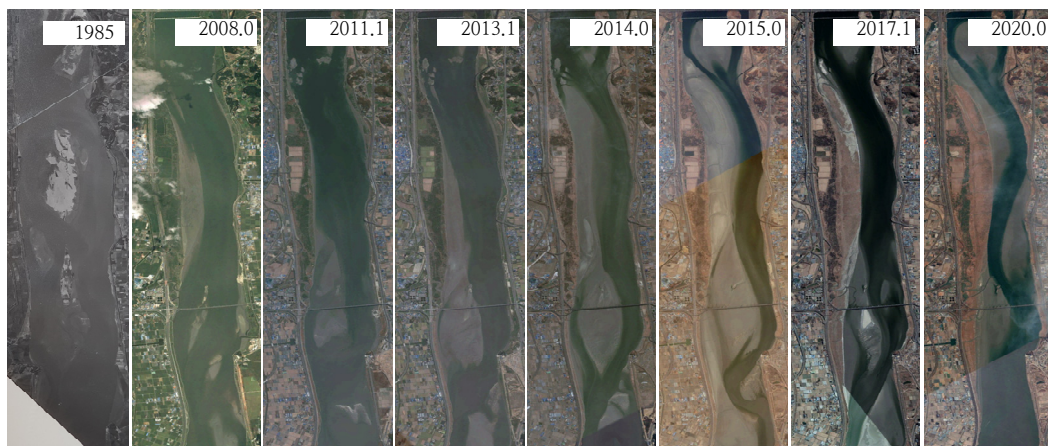


Fig. 5. Annual change of bed wave in low water channel and growth of Janghang wetland



Fig. 8. The habitat of *Bolboschoenus planiculmis* and the ecotone state around the downstream section of Janghanh wetland(2019)

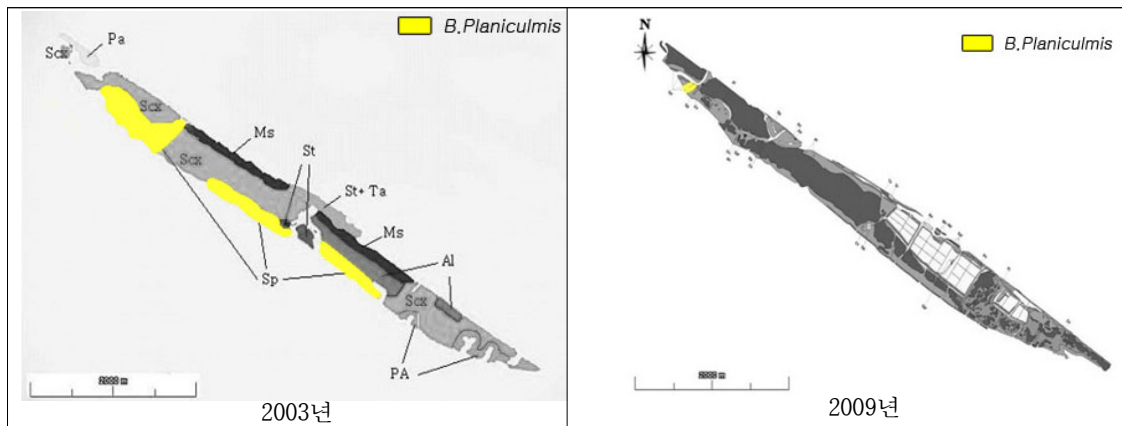


Fig. 9. The transformation of the habitat of *Bolboschoenus planiculmis* around Janghanh wetland(Han, 2019)

류단에서는 약 200m 정도 하안선이 육지 방향으로 후퇴하는 경향이 나타났다. 이는 2006년에 장항습지가 침수해 버드나무류의 수관부만 드러날 정도의 홍수량(22,900 m³/s)의 영향으로 추정한다. 2006년 당시 습지화가 되어 있던 고수부지는 저수로 하상으로부터 단차가 3~6 m 정도였다. 고수부지로 유입한 홍수류는 식생의 전도 형태를 통해 장항습지의 상류단에서 사승류(斜昇流) 형태로 유입한 것으로 2006년 조사에서 확인되었다. 이때 조사 결과 장항습지 쪽으로 미세립사가 횡적으로 확산하였으며 습지의 상류단으로부터 습지 내부로 유입해 정체하면서 퇴적된 사실을 층구조 조사를 통해 확인하였다. 한편 장항습지 하류에서는 2006년 홍수 시 빠른 흐름의 영향을 받아 침식에 의해 하안이 유실되고, 습지 표층에서는 흐름에 저항성이 강한 식생이 존재하지 않아 하안의 보호막이 없어 세굴된 것으로 추정할 수 있다. 이때 장항습지 하류부에 위치한 한류천의 유량을 배수 수문을 통해 강계 배수한 영향도 어느 정도 작용했을 것으로 추정된다. 이후에는 장항습지가 침수될 정도의 유의미한 큰 홍수가 발생하지 않았기 때문에 장항습지 하

류단에서 저수로 하안선이 확장하는 동안 선구식물이 활착할 조건이 되어 새섬매자기가 이입되기 시작한 것을 현장에서 확인하였다. 저수로 하안선 확장은 저수로 하상파(사주)가 이동한 결과물이라 판단되며 다음 절에서 분석하였다.

3.2.2 사주(습지) 성장구간에 대한 하안변화와 식생분포 조사 결과

장항습지가 현저히 성장·발달하는 하류단 구간(일산대교 전후)에 대해 2019년부터 2022년 현재까지 저수로 하안의 미지형 변화와 선구식물의 천이과정을 주기적으로 집중 관찰조사 하였다. 이 구간은 Google earth(2020)의 위성사진 분석으로부터 2011년부터 저수로 내 사주가 발달하기 시작해 2015년에는 복단면 형태의 점안사주로 발달해 식생이 피복되고 있는 것으로 나타났다. 2017년부터는 복단면이 급성장하고 아울러 저수로 하안부에서도 사주가 발달하는 곳이다.

현장 조사 결과, Fig. 7에서 보는 바와 같이 간조 때는 드러나지만 만조 때는 잠기던 하안 미지형 사주에 2019년 6

월 24일에서 2020년 07년 27일까지 약 1년 사이에 저수로 하안단구 형상의 초기 형태가 약 20 m 폭으로 나타났으며 선구식물인 새섬매자기군락이 활착하였다. 이 시기에 2020년 8월 홍수 직전까지 하상변동에 영향을 미치는 유의미한 유출은 없었다. 다만 하안부의 미식생(나대지) 사주역은 조석 영향을 받는 상태였다. 이에 따라 저수로 하안의 미지형 사주로 새섬매자기가 이입하기 시작해 대조기 조석에 따른 침수 시 부유한 실트질 미세립사가 일시에 퇴적되면서 사주 높이가 증가하고, 이후 새섬매자기가 일시에 활착 번식한 것으로 추정할 수 있다. 즉 새섬매자기군락지에서는 측방 침식을 야기하는 수리량 정도가 아니면, 통상적으로 이송되던 미세립사도 새섬매자기군락지에 퇴적되어 하상고

상승이 지속될 수 있을 것으로 사료된다. 2020년 07년 27일에 존재했던 저수로 하안부의 미지형 나대지 사주가 두 달 후인 2020년 09년 29일에는 유실된 것을 확인하였다. 이로써 저수로 하안부의 퇴적지에 선구식물의 이입으로 저수로와 습지를 경계 지을 수 있는 명확한 하안선이 형성된 것을 확인할 수가 있었다.

2019년 9월 7일 발생한 태풍 링링에 따른 유출의 전후를 비교하면 선구식물의 존재 여부에 따라 하안선이 더 명확하다. 이는 미지형 사주에 선구식물이 존재하지 않을 경우에는 조석에 의한 하안포락이 발생한 것을 나타낸다. 장항 습지가 침수된 2020년 8월 21,170 m³/s의 홍수유출 이후 신생 새섬매자기군락지에 미세립사의 퇴적과 함께 저수로

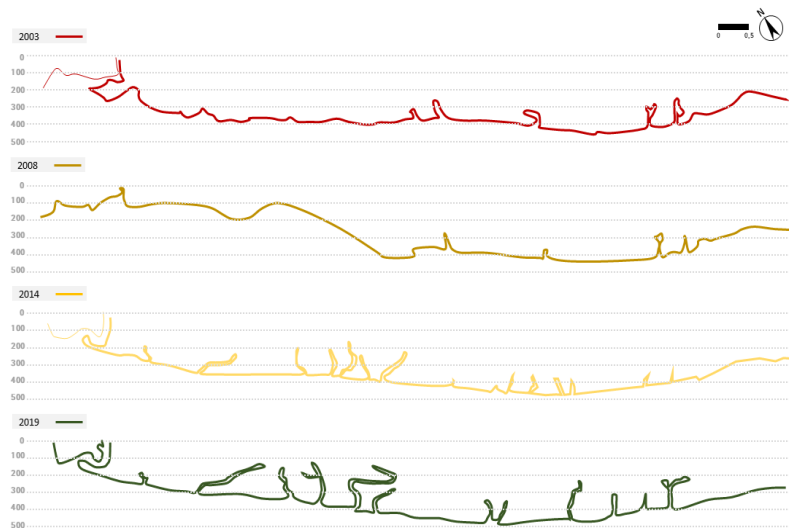


Fig. 6. Annual low-channel line transformation at Janghang wetland(Choi, 2019)



Fig. 7. Transformation of low-channel and plant success in the developed section of Janghang wetland

나대지 사주역과 식생역 경계부에 명확한 단차가 형성되면서 저수로 하안선이 명확해졌다. 이로써 약 2년 사이 새섬매자기군락지가 갈대군락으로 빠르게 대체되고 있음을 확인할 수 있었다. 새섬매자기의 생육장소는 토양수분이 충분한 곳에서 우점하지만 복단면 형상을 이루면서 지하수위가 하강해 토양수분이 충분히 포화되지 않으면 갈대나 물억새 등으로 식물천이가 전개되는 것을 확인할 수 있다.

3.3.3 하안퇴적 구간의 선구식물(새섬매자기) 군락지 특성과 수분 경사별 식생 분포

장항습지 성장구역인 저수로 퇴적 사주부에 선구적으로 활착하는 것으로 확인된 새섬매자기(*Bolboschoenus planiculmis*)는 하구 고유식생으로 주로 대형조류의 먹이가 되는 사초과 식물로서 군락형태를 이룬다(Fig. 8). 가을철에 주로 전분이 많은 지하경을 만들어 겨울을 나고 이듬해 봄에 새싹을 내는 다년생 수생식물이다. 실트 등 미세립사가 섞인 사질 토양에 자생하며 주로 개리, 재두루미 등의 먹이 원이다.

이러한 장항습지 내 새섬매자기의 침퇴적 영향을 분석하기 위해 2003년, 2006년, 2007년 2009년 장항습지 내 현존식생, 특히 새섬매자기의 경년변화에 대해 추적 조사하였다(Han, 2019; Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 2019). 이에 따르면 Fig. 9에서 보는 바와 같이 저수로 하안부에서 퇴적이 지배하던 공간에 활착한 새섬매자기군락 면적이 일방적으로 감소하다가 2009년에는 거의 99 % 감소하고 장항습지 하류단의 극히 일부 분에만 존재했다. 이는 장항습지가 현저한 하도복단면이 된 이후 고수부지에서 나타난 현상이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 저수로 하안에서 사주가 발달해 중형단으로 성장하는 곳에서는 가장 먼저 선구식물인 새섬매자기의 나타나는 것으로 확인되었다. 즉 한강하구에서 고유 동·식물종의 보호를 위해서 습지에 대한 자연교란의 제한적 허용을 의미한다.

2019년에는 장항습지 전체에 걸쳐 현존식생 조사를 실시하였다. 조사 결과를 바탕으로 수분 경사에 따른 식생 천이

(발달) 상황과 성장별 현존 식생 구분을 Table 2에 나타내었다. 여기서 밀물 정지기에 저수로 내 수중의 이동상 사주에서는 염습지식생과 담수식생이 공존하는 하구의 특징이 잘 나타나고 있다. 특히 사주가 갯벌 형태로 형성되어 교란이 활발한 곳에는 1~2년생의 염습지 식생인 나문재가 선구적으로 진입하고, 이어 담수 혹은 하구에 생육하는 나사말 등 침수식물이 다년생 구조로 활착하는 양상이 나타나고 있다. 저수로 수변부 식생은 1~2년생과 다년생 담수식생이 공간적으로 구분되어 분포하고 있는 바, 이는 저수로 수변의 사주의 성장과 식생이 상호관계가 있음을 나타낸다. 장항습지에서는 물골 등에는 1~2년생 담수식생이 나타나지만, 물골을 제외한 고수부지에서의 식생은 저수로 하안부 식생과 확연히 구분 지을 수 있는 다년생 식생과 함께 육역화의 상징인 관목과 교목이 밀생하고 있음이 확인되었다.

본 연구에서는 저수로 하안에 실트질 미세립사가 퇴적한 공간에 새섬매자기의 유입한 후 시간이 지나면서 이곳이 하안단구로 복단면의 초기 양상을 보이는 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 장항습지 수분 경사에 따른 식물 분포를 볼 때 장항습지 하류단에서 횡단 추이대가 무식생 이동사주→새섬매자기군락→갈대군락→버드나무류군락→물억새군락 순으로 구분되며 현존 식물상으로 식물천이가 전개되는 특징을 파악하였다.

4. 장항습지 형성 기작에 대한 평가

4.1 장항습지의 초기 형성 원인 평가

현재의 장항습지 구역은 앞에서 전술한 바와 같이 하천종합개발사업 이전의 1966년 항공사진에서는 존재하지 않았다. 오히려 백마도 주변 하도 협착부 하류에 자연 발생적으로 형성된 하중도(제주초도, 하폭의 35%)의 영향으로 발생한 분파 흐름에 따른 저수로 수역이었다. 이후 신곡수중보 축조, 하상준설, 일산제 재해복구 공사가 완료된 2000년도 위성사진에는 제주초도 모습은 사라지고 대신 거의 같은 면적과 폭(기존하도의 약 30 %)의 장항습지가 나타났다.

Table 2. The distribution of plant around Janghang wetland according to the slope of wet rate

	침수식생	염습지식생	수변부식생	고수부지식생	제방부식생	인위식생
1~2년생	-	나문재	여뀌, 돌피, 명아지여뀌, 참새귀리 등	고마리, 미나리 등	-	벼경작지 식생 밭경작지 식생
다년생	나사말, 말즘, 이삭물수세미, 실말 등	갯잔디	새섬매자기, 세모고랭이, 너도방동사니, 줄, 애기부들, 갈대 등	갈대, 물억새, 달뿌리풀, 쇠치기풀, 도루박이 등	억새, 띠, 개속새, 쇠뜨기, 쭈 등	밭경작지 식생 노상노변 식생
관목성	-	-	-	갯버들, 키버들	족제비싸리, 짚레나무, 쥐뚫나무 등	사방용식생 (족제비싸리 등)
교목성	-	-	-	선버들, 버드나무, 가래나무, 비술나무, 산뽕나무 등	-	외래식물 (양버즘나무, 아까시나무 등)
외래종	-	-	미국가막사리, 큰비짜루국화	가시박, 단풍잎돼지풀, 환삼덩굴 등	미국쭉부쟁이	망초, 개망초, 명아주, 나도바랭이 등
비 고	-	-	선버들 유묘 발견	배후습지식생 빈약	-	-

Table 3. Condition of channel near Janghang wetland in Hangang river estuary

조건	값	조건	값
측선거리	1.5 km	홍수 수면경사	1/3,850
평균수심	10.0 m	하상재료(D60)	0.25 mm
표고차	6.0 m	표층 하상토	0.05~0.07 mm

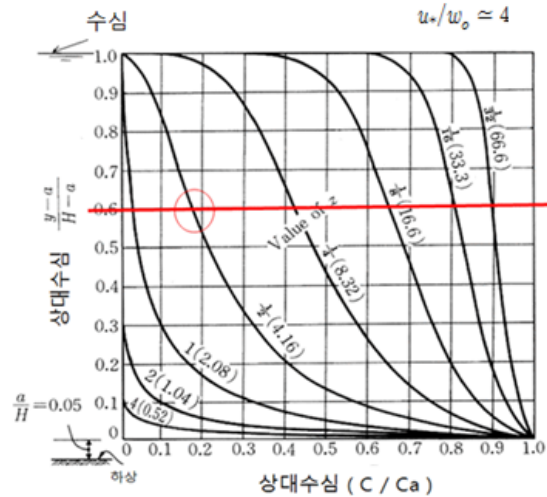


Fig. 10. Sediment rate in low water channel around wetland based on Rouse method

이에 대해 2005년도 정부에서 한국건설기술연구원에 의뢰한 하류부 하상변동 조사 사업에서 실시한 장항습지 층구조 조사(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005)와 2019년도 장항습지 표토층 조사 결과(Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 2019), 저수로 하상으로부터 장항 IC 기점의 측선을 기준으로 표고차 5~6 m 정도의 하도복단면 형태를 확인하였다. 초기 장항습지의 층구조 조사에서는 하도복단면 표층 퇴적층이 실트질 미세립사로 구성되어 있었으며, 표토층 아래 층에서는 저수로의 주재료인 모래(0.3~1 mm 정도)와 거의 같은 입경의 퇴적물이 분포하는 등 하상재료가 혼합되어 있었다.

한편 사주 기저층의 하상재료인 가는 모래가 설계홍수량 규모에서 습지인 하도복단면의 표층에 쌓여 가면서 형성될 수 있는 조건인지를 조건이 거의 같고 자료가 충분한 산남습지를 대상으로 Table 3의 조건과 Rouse 분포법을 활용하여 해석하였다(Tsutsumi and Laronne, 2017). 해석결과(Fig. 10) 저수로 하상재료는 고수부지까지 부상해 유의미한 퇴적으로 이어지지 않아 저수로 하상재료가 장항습지를 형성하는 충분한 조건이 될 수 없다는 것으로 판단되었다.

이에 따라 장항습지 초기 형태는 하천정비에서 없어진 제주초도 하폭만큼 고수부지를 조성해 하천시설물 보호를 위해 저수로 하상의 준설토로 인위적으로 조성했거나, 제주초도에 이루어지던 대체 경작지 조성 목적으로 정비한 것으로 판단된다. 한편 장항습지 내에서는 준설 차량 통행길로 추정되는 굵은 자갈길이 목격되는 바, 준설 시 장항습지

일부가 사토장으로 활용된 것으로도 보인다. 이러한 인위적인 조성 작업이 이루어진 것으로 확인되면 초기 형태의 장항습지는 대홍수에 따른 자연교란에 응답하지 않으면서 워시로드 성향의 실트질 미세립사가 밀생하는 식물과 상호작용하여 퇴적이 지배해 성장한 것으로 판단된다.

4.2 장항습지의 성장 확대 원인에 대한 평가

초기 형태의 장항습지가 고착되고 2011년 중규모 홍수(홍수량 : 19,320 m³/s) 때 장항습지 주변 저수로에서는 하상이 평탄화된 것으로 추정된다. 이와 함께 장항습지 하류단과 일산대교 복단 방향으로 저수로 내 사주가 모습을 드러냈다. 그리고 2012년 6,350 m³/s의 소규모 유출과 2013년 10,830 m³/s의 지배유량 규모의 유출로, 장항습지 하류단에 길게 새로 형성된 습지의 기저층이 되는 사주가 조성된 것을 확인할 수 있었다. 저수로의 중규모 하상파인 교호사주 양상을 띠기 시작한 이때부터 장항습지는 횡적으로 초기 장항습지와 유사한 복단면 형태를 이루기 시작했다.

비홍수기에 접어들어 이후부터는 교호사주가 교란되지 않아 Table 1에서 조사된 침수식생, 염습지식생, 수변식생의 선구식물이 활착하기 시작한 것으로 보인다. 이로써 실트질 미세립사가 포집되어 퇴적을 지속한 것으로 추정할 수 있다. 이는 2005년 장항습지 층구조 조사에서 측선 No. 39과 No. 44에 나타난 미세립토의 염리층을 통해 유추할 수 있다. 한편 최대유심선에서의 저수로 하상과 폭이 좁아지기 시작하면서 교호사주 형태의 중규모 하상파가 확연히 나타났다. 초기 나대지 교호사주에서의 입경은 조석에 따른 창

조기 유속과 2016년, 2017년, 2018년에 발생한 소규모 유출에도 퇴적물 이동이 가능한 크기인 0.25 mm 정도이며, 최대유심선에서 저수로 하상파 폭이 좁아지는 것에 비례해 수심이 깊어지면서 상대적으로 사주는 높아졌다. 2020년 최근 위성사진에서는 2005년 장항습지의 폭과 비교하여 25% 정도 폭이 더 넓어지면서 하폭의 절반 정도로 확대된 것을 확인하였다. 향후 홍수 빈도와 규모 및 사주 내 식물 종에 따라 교호사주가 성장 혹은 후퇴를 결정짓게 될 것으로 보인다.

4.3 습지 성장 구간에서 선구식물의 역할

앞에서 저수로 하상이 세굴되고 홍수가 없는 비홍수기에는 조석 작용으로 말미암아 다시 메워지는 현상을 검토하였다. 저수로 하상변동은 비홍수기에는 퇴적 경향을 나타낸다. 한강하구역에서는 부유사의 수지와 저수로 하상변동량을 살펴볼 때 유출되는 부유사의 순누가량이 유입되는 양보다 많지만 결국 저수로 하상변동에서는 저수로 하상재료의 소류거동에 따라 지배된다는 것을 알 수 있다. 이는 4.2에서 서술한 새로 확대되는 습지 기저층의 형성 기작에 해당한다.

순부유사 누가량(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008)은 전체 유입량과 유출량의 약 16% 정도로 낙조기 유출이 창조기 유입보다 다소 많다는 것을 확인할 수 있었다. 비홍수기에 미세립사는 낙조기에 유출되는데 저수로 수변에 쌓이는 이유는 흐름 차이에 따른 국지 퇴적과 함께 수변 표층에 이입되는 선구식물과 관계가 있으며 이에 대해서는 3.2.2에 기술하였다. 습지의 기저층이 형성된 후 습지를 교란시킬 규모의 유출이 발생하지 않으면 신생 습지역에 선구식물이 활착하고 부유사를 포집한다. 이렇게 포집된 미세립사는 표층에 층리를 형성하면서 퇴적이 지배하게 된다. 이로부터 한강하구에서 습지형성 과정에 실패트질의 미세립사가 중요한 매개체임을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서 하도변화와 식물천이에 대해 지속적으로 현장 추적 조사를 통해 장항습지의 형성 기작을 규명하고자 하였다. 규명 과정에서 유량에 따른 하도 미지형 변화와 식물천이 사이에서는 작용과 응답의 원리가 작용하는 것으로 드러났다.

초기 장항습지는 유사 거동 특성에 대한 수리평가에 의하면 그동안 알려진, 홍수라고 하는 작용에 응답하는 형태인 중규모 하상파, 즉 사주의 반응에 따른 결과물이 아니라 인위적으로 조성된 것이라 추정된다. 그리고 2020년 위성사진에서는 장항습지의 폭이 25% 정도 더 넓어지면서 장항습지의 폭이 하폭의 절반 정도로 확대된 것을 확인하였다. 이는 수역이 육역으로 성장·확대되는 과정에서 저수로의 중규모 하상파인 교호사주 양상을 띠기 시작하면서 비롯된

것으로 판단된다. 즉 비홍수기에 접어든 이후부터는 교호사주가 교란되지 않아 침수식생, 염습지식생, 수변식생의 선구식물이 활착하고 실패트질 미세립사가 이에 포집되어 지속적으로 퇴적된 것으로 평가할 수 있다.

한편 한강 기수역에서는 부유사의 수지와 저수로 하상변동량을 살펴볼 때 유출되는 부유사의 순누가량이 유입되는 양보다 많지만 결국 저수로 하상변동은 저수로 하상재료의 소류거동에 따라 지배된다는 것을 알 수 있었다. 순부유사 누가량을 보면 낙조기에 유출이 창조기 유입보다 다소 많이 유출됨에도 불구하고 저수로 수변에 쌓이는 이유는 흐름 차이에 따른 국지 퇴적과 함께 수변 표층에 이입된 선구식물과 관계가 있는 것으로 확인되었다. 즉 습지의 기저층이 형성된 후 습지를 교란시킬 규모의 유출이 발생하지 않으면 신생 습지역에 선구식물이 활착해 부유사를 포집하고 표층에 미세립사가 퇴적되면서 층리를 형성하게 된다.

선구식물이 물리기반 조건에 따라 다른 식물종으로 천이되는 것도 현장 조사에서 나타났다. 하상의 주재료(main materials of river bed)가 아니어서 공학적인 분석방법인 하상변동 해석에서 거의 배제하는, 부재료(sub materials)인 점성의 미세립사가 표층 하상재료(silty wash load)로 새선패자기 등과 같은 선구식물(pioneer plant)에 포집되면서 고수부지와 같은 복단면 형태(compound cross section)의 습지로 성장하는 데 중요한 매개 역할을 하는 것으로 나타났다. 습지가 하도복단면 형태로 발달한 후에는 선구식물이 다른 식물종(교목류 등)으로 천이되는 양상도 보였다.

한강하구 장항습지에서 초기에 형성된 구역 외에 흐름과 같은 작용에 응답한 습지는 홍수빈도와 규모 및 사주 내 천이되는 식물종에 따라 교호사주의 성장 혹은 후퇴를 결정짓게 될 것으로 보이며 이에 대한 국가적인 대책 수립과 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 (22주요-대1-목적) ‘기후위기 대응 물문제 해결형 남북한 이슈 발굴 및 미래선도 기술개발(1/1)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ASCE (2008) Sedimentation Engineering, the American Society of Civil Engineering, ASCE
- Choi J.K. (2019) 한강하구 하천식생의 물리기반에 대한 자문의견서, Korea Institute of Civil engineering and building Technology [Korean Literature]
- Goyang city (2020) 장항습지 드론 촬영 사진, Goyang city
- Google Earth (2020), Google
- Han D.W. (2019) 한강하구 장항습지의 식생분포 경년변

- 화에 대한 자문의견서, Korea Institute of Civil engineering and building Technology [Korean Literature]
- Korea Institute of Civil engineering and building Technology (2019) 한강하구역 사주거동과 시설물안전성에 관한 조사연구, Korea Institute of Civil engineering and building Technology [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2005), 한강하류부 하상변동조사 연구보고서, Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2008), 2006-2008 한강하류부 하상변동조사 연구보고서, Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), 한강하류부 문발제 구간 유사거동에 따른 하도특성에 대한 연구보고서, Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020) 한강(팔당댐~하구) 하천기본계획(변경) 보고서, Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Korean Literature]
- National Geographic Information Institute(<https://www.ngii.go.kr>) (2022)
- Tsutusuni D. and Laronne J. (2017) Gravel-Bed Rivers : Process and Disasters, Wiley Blackwell
- U.S Army Engineer Research and Development Center (2021), International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management, U.S Army Engineer Research and Development Center
- WAMIS(WATER resources Management Information System) (2021), K water
- Yamamoto K. (2018), 충적하천학, 형설출판사 [Korean Literature]