생태계 보호를 고려한 남북공동수로의 친환경 준설시기 분석

Analysis of Environmentally Friendly Dredging Season for a Waterway Shared by South Korea and North Korea Considering Ecosystem Protection

정안철* · 김성원** · 최미경*** · 정관수****

Jeong, Anchul*, Kim, Seongwon**, Choi, Mikyoung***, and Jung, Kwansue****

Abstract

Recently, a survey was conducted of the waterway shared by South Korea and North Korea. In the Han River Estuary, the need for dredging emerged due to serious riverbed aggradation. Dredging is the most efficient way to remove deposited sediment. However, it is expensive and has negative impacts on society and the environment. The negative impacts of dredging occur both in water and on land, causing huge disturbances to ecosystems. In this study, an environmentally friendly dredging season was proposed using the non-structured method of environmental windows to minimize the negative impacts of dredging. To establish environmental windows, the growth stages of six species in the Han River Estuary were used. Results showed that dredging in November could minimize its negative impacts and that dredging between October and December would be appropriate when it had to persist for more than two months. The negative perception of dredging has been increasing from the Four Rivers Project. This study will be applied to this situation, to mitigate the negative impacts of dredging, provide basic data pertaining to river construction considering the ecosystem, and support decision-making.

Key words : Shared Waterway, Dredging, Ecosystem Protection, Han River Estuary

요 지

최근 남북공동수로 조사가 마무리되면서 하상상승이 심각한 한강하구에 대한 준설 필요성이 대두되고 있다. 준설은 퇴적된 유사를 가장 확실하게 제거할 수 있지만, 비경제적이고 사회·환경적인 측면에서 부정적인 영향이 큰 건설공사로 알려져 있다. 준설의 부정적인 영향은 수역은 물론 육역에서도 발생하며 생태계에 매우 큰 교란요인으로 작용하게 된다. 준설의 부정적인 영향을 최소화하기 위해서 본 연구에서는 환경창이라는 비구조물적 방법을 이용하여 친환경 준설시기를 제시하였다. 환경창 수립을 위해서 한강하구에 서식하는 것으로 알려진 6분류군의 생물종의 성장단계를 이용하였다. 그 결과, 11월에 준설하는 것이 준설의 부정적인 영향을 최소화할 수 있으며, 2개월 이상 준설 시에는 10월에서 12월 사이에 준설하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 4대강 살리기 사업부터 시작하여 준설에 대한 부정적인 인식이 증가하고 있는 상황에서 본 연구는 준설의 부정적인 영향을 완화하고 생태계를 고려한 하천공사에 대한 기초자료 제공 및 의사결정 지원 등에 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 공동수로, 준설, 생태계보호, 한강하구

*정회원, 국립환경과학원 국립습지센터 전문위원(E-mail: anchuly@korea.kr)

Member, Researcher Fellow, National Wetlands Center, National Institute of Environmental Research

**정회원, 충남대학교 국제수자원연구소 연구원

Member, Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

***정회원, 충남대학교 국제수자원연구소 연구원

Member, Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

****교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-42-821-5675, Fax: +82-42-821-8957, E-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

1. 서 론

2018년 9월 19일에 이루어진 군사 분야 합의서에 따라 2018년 11월 5일부터 9일까지 660 km 구간에 대해서 공동 수로조사를 실시하였다. 이번 조사는 남·북간 한강과 임진강 하구의 공동이용을 위한 목적으로 실시되었으며, 이를 통해 수로측량 및 항해정보를 체계적으로 구축하여 선박의 자유로운 항해를 보장할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 남북공동수로 조사결과, 압초와 하상상승 우심지역 등을 확보하여 선박의 안정항해 정보, 골재채취를 비롯하여 관광·휴양, 생태보전 등 다양한 사업의 병행 추진이 가능하게 되었다. 전술한바와 같이 남북공동수로조사 결과로 예상강 하구 지역의 하상상승이 심각한 수준으로 소형 선박도 통행이 어려운 것으로 나타났다. 홍수 후 정밀조사가 필요하지만 예상강 하구 등의 지역은 준설 필요성이 대두되면서 골재자원 조달의 어려움을 해소할 것으로 기대되고 있다.

준설은 퇴적된 유사를 가장 확실하게 제거할 수 있지만, 비경제적이고 사회·환경적인 측면에서 부정적인 영향이 큰 건설공사로 알려져 있다(Herbich, 2000). 준설의 부정적인 영향을 수역과 육역으로 구분하면 수역에서는 준설장비 투입 및 운용으로 인해서 탁도 및 소음이 증가한다. 이로 인해서 수상 및 저서 생물의 서식처 파괴, 개체수 변화, 종 다양성 변화, 어류 이동의 연속성 파괴 등으로 이어진다. 육역에서는 준설장비의 이동 및 운용, 준설토 처리장과 적치장 등으로 인해서 소음 및 준설토 침출수 등이 발생하게 된다. 이는 육상동물의 서식처 파괴, 침출수에 의한 하천 및 지하수 수질 악화, 식생 감소 등으로 이어진다. 이 외에도 수역과 육역을 막론하고 경관훼손, 소음공해, 친수활동 저해 등의 문제가 발생할 수 있다(Jeong et al., 2015).

한강 하구는 2006년도에 환경부의 습지보호지역으로 지정되어 있으며, 열린 하구로서 넓은 기수역 구간을 형성하여 생태적 가치가 우수한 것으로 알려져 있다. 자연하구로 생물 다양성이 풍부하고 다양한 생태계가 발달되어 있으며, 특히 멸종위기 야생생물 20종을 포함한 664종의 생물종이 서식하는 것으로 조사되었다(NIER, 2016). 따라서 습지보호지역으로 지정된 한강 하구의 습지와 생태계 보호를 고려한 준설 계획 수립이 필요하다.

준설이 사회·환경적으로 미치는 부정적인 영향을 최소화하기 위해 환경준설 공법 및 장비들이 다양하게 개발되어 왔으나, 준설 중에는 부정적인 영향이 급격하게 증가되는 것이 일반적이다(Jeong, Kim, Yu, et al., 2016). 최근에는 이러한 구조적 방법 외에도 비구조적 방법에 대한 연구가 다수 진행되고 있으며, 그 중 환경창(Environmental Windows, EWs)이 대표적이라고 할 수 있다. 환경창은 준설 및 준설토 처분에 대한 영향이 최소가 되는 기간에 준설을 수행하도록 지정한 기간을 의미한다(Dickerson et al., 1998). 환경창 외에도 준설시기를 결정하는 연구는 다양하게 수행되어 왔으나,

대부분 생태나 환경을 고려하진 않고 있다는 한계가 있다(Wang et al., 2003; Lee et al., 2004; Ning et al., 2012; Adrichem, 2013). 반면에 환경창은 1년을 월별로 구분하여 준설이 가능한 기간인 work windows와 준설을 제한하는 seasonal restriction으로 구분되어 있다. 환경창의 work windows 기간 내에 준설을 완료하지 못하면 다음 work windows 기간까지 대기함에 따라 공기가 증가하여 경제성이 낮아지고, 한 지역에 다양한 생물종에 대한 환경창이 수립되면 work windows를 산정하기 어렵다는 단점이 있다. 그리고 현재까지 환경창 수립기준이 명확하게 확립되지 않아 전문가의 의사결정에 따라 수립되어져 비과학적이라는 단점이 지적되어 왔다(TRB, 2001). 이러한 단점을 보완하기 위해서 Jeong et al. (2015)은 정규분포의 누가분포함수를 이용한 환경창 지수를 제안하였으며 생물종의 성장단계를 지수화하여 낙동강 유역에 적용한바 있다. 그리고 이 방법의 검증을 위하여 샌프란시스코 만에 수립되어 운영 중인 환경창에 적용하여 방법론의 타당성을 입증하였다(Jeong, Kim, Kim, et al., 2016). Jeong, Kim, Yu, et al. (2016)은 Jeong et al. (2015)의 연구에서 제안한 환경창 지수 산정 방법이 다소 복잡하기 때문에 효용함수를 이용하여 이를 개선하고 4대강 다기능보에 대한 환경창 지수를 산정하였다. 그러나 통합 환경창을 수립하면서 각 생물종에 대해 동일 가중치를 적용하여 각 생물종의 특성을 반영하지 못한 한계점이 있었다. 본 연구에서는 환경창을 구성함에 있어서 생물종의 특성을 고려하여 가중치를 적용하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 남북공동수로인 한강 하구에서 준설이 이루어질 경우 환경·사회적인 측면에서 부정적인 영향을 최소화하기 위해 친환경 준설기간을 환경창을 통하여 제시하였다. 이를 위해서 한강 하구 습지를 대상으로 이루어진 생태계 조사 자료를 활용하여 환경창 지수를 산정하였으며, 각 생물종의 특성을 고려하여 가중치를 산정하고 환경창을 수립하였다. 그리고 수립된 환경창과 홍수기, 결빙기를 고려하여 친환경 준설기간을 산정하였다. 전술한 바와 같이 남북공동수로의 환경창을 수립하는 과정을 요약하면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Flow Chart for Optimal Dredging Season Estimation Using EWs

2. 연구대상지 및 연구방법

2.1 연구대상지

한강 하구는 2006년에 습지보전법에 의해 습지보호지역으로 지정되었으며 국내 대하천 중에서는 유일하게 하굿둑이 설치되지 않은 열린 하구(open estuary)이다(ME, 2016). 한강 하구 습지보호지역은 인천광역시 강화군 송해면 송피리를 기점으로 김포대교 남단에 위치한 신곡수중보까지 약 43.5 km에 걸친 제외지 구간이며 지정면적은 60.668 km²이다. 남북공동수로 조사구간은 인천광역시 강화군 서도면 말도리를 기점으로 예성강 합류점을 지나 경기도 파주시 만우리의 임진강 하류부를 포함한다. 조사구간은 약 70 km, 면적은 280 km²로 한강 하구 습지보호지역보다 넓다(Fig. 2). 해양수산부 국립해양조사원이 공개한 해저지형도(Fig. 3)에 의하면 공동수로 조사구간 대부분이 퇴사가 상당히 진행된 것을 알 수 있으며, 특히 예성강 하구는 수심이

50 cm 정도인 구간도 존재하는 것으로 나타났다.

한강 하구 습지보호지역은 2004년을 기점으로 총 4회 정밀조사가 이루어졌으며, 5~8 분류군에 해당하는 생물을 대상으로 하였다(NIER, 2005, 2016; NWC, 2011, 2016). 본 연구에서는 2004년부터 2016년까지 조사된 멸종위기 야생생물 중 어류, 양서·파충류, 조류, 포유류, 무척추동물을 대상으로 연구를 수행하였으며, 각 시기별 멸종위기 야생생물 목록을 따라 작성하였다(Table 1). 멸종위기 야생생물은 야생생물 보호 및 관리에 관한 법률을 통해서 보호하고 있으며 최근에는 복원에 대한 연구도 이루어지고 있는 점을 감안하여 해당지역의 서식특성을 나타내는 우점종보다는 멸종위기 야생생물을 대상으로 연구를 수행하였다. 조사의 시기와 강도, 조사자와 분류군의 특성에 따라 조사 결과에 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 한강 하구에서는 멸종위기 야생생물이 2004년에는 총 16종, 2011년에는 18종, 2016년에는 21종이 출현하는 것으로 조사되었다.

Fig. 2. Study Area, Shared Water Way and Han River Estuary Wetland

Fig. 3. Shared Channel Seabed Topography Map

Table 1. Survey Results as Endangered Wild Species

Survey year	Taxon	Number of species	Endangered wild species
2004	Fish	1	<i>Saurogobio dabryi</i>
	Amphibians-Reptile	2	<i>Pelophylax chosonicus</i> <i>Kaloula borealis</i>
	Bird	12	<i>Platalea minor</i> , <i>Haliaeetus albicilla</i> , <i>Falco peregrinus</i> , <i>Grus vipio</i> , <i>Anser cygnoid</i> , <i>Anser fabalis</i> , <i>Pandion haliaetus</i> , <i>Milvus migrans</i> , <i>Buteo buteo</i> , <i>Aegypius monachus</i> , <i>Circus cyaneus</i> , <i>Charadrius placidus</i>
	Mammal	1	<i>Felis bengalensis euptilura</i>
2011	Amphibians-Reptile	2	<i>Pelophylax chosonicus</i> , <i>Kaloula borealis</i>
	Bird	15	<i>Platalea leucorodia</i> , <i>Platalea minor</i> , <i>Haliaeetus albicilla</i> , <i>Aegypius monachus</i> , <i>Gallinix cinerea</i> , <i>Pandion haliaetus</i> , <i>Buteo buteo</i> , <i>Falco vespertinus</i> , <i>Falco subbuteo</i> , <i>Falco columbarius</i> , <i>Bubo bubo</i> , <i>Grus vipio</i> , <i>Accipiter gentilis</i> , <i>Anser fabalis</i> , <i>Buteo hemilasius</i>
	Mammal	1	<i>Felis bengalensis euptilura</i>
2016	Amphibians-Reptile	3	<i>Pelophylax chosonicus</i> , <i>Hyla suweonensis</i> , <i>Elaphe schrenckii</i>
	Bird	16	<i>Aquila chrysaetos</i> , <i>Haliaeetus pelagicus</i> , <i>Haliaeetus albicilla</i> , <i>Falco peregrinus</i> , <i>Platalea minor</i> , <i>Grus vipio</i> , <i>Accipiter nisus</i> , <i>Circus melanoleucos</i> , <i>Circus cyaneus</i> , <i>Aegypius monachus</i> , <i>Pandion haliaetus</i> , <i>Ixobrychus eurhythmus</i> , <i>Platalea leucorodia</i> , <i>Cygnus cygnus</i> , <i>Anser fabalis</i> , <i>Anser cygnoid</i>
	Mammal	1	<i>Felis bengalensis euptilura</i>
	Invertebrates	1	<i>Sesarmops intermedius</i>

2.2 연구방법

한강 하구의 친환경 준설시기를 산정하기 위하여 본 연구에서는 환경창 지수를 이용하였다. 환경창 지수는 준설에 의한 부정적인 영향이 생물군의 성장단계가 낮을수록 크게 영향을 받는다는 가정을 통해서 개발되었으며, Jeong (2018)에 의해서 그 실효성이 검증된 방법이다. 환경창 지수를 이용하여 친환경 준설시기를 산정하기 위한 과정은 크게 자료구축 단계, 성장단계 등급화 단계, 개별 환경창 수립 단계, 통합 환경창 수립 단계, 친환경 준설시기 산정 단계와 같이 5단계로 구분된다. 본 연구에서는 멸종위기 야생생물을 중심으로 환경창 지수를 산정하였으며, 각 분류군에 따라 개발된 환경창을 개별 환경창이라 하였다. 각 분류군에 따른 개별 환경창은 한 지역에 다양한 환경창이 수립되었을 경우에 환경창이 누적되어 준설시기를 설정하기 어렵게 되며, 이러한 상황을 환경창의 누적효과(cumulative effect)라고 한다(Reine et al., 1998). 이러한 상황을 완화하기 위하여 개별 환경창에 가중치를 적용하여 통합 환경창을 개발하였으며, 가중치는 분류군의 이동성 및 회피성 등을 고려하여 산정하였다.

일반적으로 준설은 홍수기보다 갈수기에 유리하고 홍수기에는 준설장비의 계류 및 위험에 대한 문제가 있다. 홍수기에는 유사를 제거하는 방법이 준설보다는 토사토출(sediment sluicing)이 유리하기 때문에 홍수기에 준설은 수행하는 것은 바람직하지 않다. 또한 결빙기의 경우에는 하천의 결빙으로

준설장비의 운용이 어렵다는 문제가 있다. 따라서 환경창을 하천에 적용하기 위해서는 해안·항만과는 다르게 이러한 문제에 대한 고려가 이루어져야 한다. 이를 위해서 홍수기는 댐 관리규정(K-water, 2012)에서 제시하고 있는 6월 21일부터 9월 20일까지인 점을 참고하여 7월부터 9월까지를 홍수기로 고려하였다. 결빙기는 기상청에서 관측을 수행하고 있으나 일부 지점을 대상으로 관측이 이루어지고 있으며 매년 최초 결빙 시기만을 제시하고 있어 결빙기에 대한 고려가 어려워 1월과 2월을 결빙기로 가정하였다. 위와 같은 사항들을 고려하여 하강 하구 준설에 대한 친환경 준설시기를 산정하고 분석하였다.

3. 환경창 지수 및 자료구축

3.1 환경창 지수 산정방법

환경창을 이용하여 한강 하구의 친환경 준설시기를 산정하기 위해서 환경창 지수를 이용하였다. 환경창 지수는 각 생물군의 성장단계를 이용하였으며, 낮은 성장단계에서 준설의 부정적인 영향이 크다는 가정 하에 등급을 부여하였다. 따라서 낮은 성장단계에 대해서 등급 1을 부여하였으며 성장단계가 진행될수록 등급을 1씩 증가시켜 성장단계에 대한 등급을 부여하였다. 각 분류군의 성장단계에 부여된 등급에 효용함수 Eq. (1)을 적용하여 환경창 지수를 산정하였다.

$$u_i = \frac{z_i - \min(z_i)}{\max(z_i) - \min(z_i)} \quad (1)$$

여기서 u_i 는 i 의 효용으로 환경창 지수, i 는 생물 분류군, z_i 는 i 의 척도로 각 월별로 분류군에 부여된 등급, $\max(z_i)$ 와 $\min(z_i)$ 는 각 분류군의 최대·최소 등급을 의미한다.

위와 같이 산정된 환경창 지수는 0.0~1.0의 범위에 분포하게 된다. 환경창 지수가 1.0에 근접할수록 준설의 부정적인 영향이 상대적으로 적은 work windows에 근접하게 되며, 0.0에 근접할수록 준설의 부정적인 영향이 상대적으로 큰 seasonal restriction과 같게 된다.

3.2 환경창 대상 생물종 선정 및 자료 구축

한강 하구에서 발견된 멸종위기 야생생물은 어류, 양서류, 파충류 등 총 6종류로 구분할 수 있으며, 6종류에 해당하는 다양한 생물에 대해서 환경창을 수립하는 것을 비효율적일 수 있다. 그 주된 이유는 생물의 성장단계에 대한 자료가 부족할 수 있고, 자료가 충분하다 할지라도 생물의 성장단계가 유사할 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 무척추동물, 어류, 양서류, 파충류, 포유류, 조류와 같이 6가지 생물에 대해서 대표 종을 선정하고 자료구축 및 환경창 지수를 산정하였다.

무척추동물을 비롯하여 어류, 파충류, 포유류는 하나의 생물 종 서식이 확인되었기 때문에 해당 생물 종을 환경창 대상으로 선정하였다. 무척추동물과 어류는 수체 내 탁도와 하상 저질이 서식에 큰 영향을 미치고 그 외의 생물 분류군은 상위포식자에 해당하여 먹이사슬을 이루고 있기 때문에 간접적인 영향을 받게 된다. 따라서 서식이 확인된 6 생물 분류군을 선정하여 연구를 수행하였다. 어류의 경우 두우쟁이

(*Saurogobio dabryi*)의 서식이 2004년 조사에서 확인되었으나, 이후 조사에서는 멸종위기 야생생물의 서식이 확인되지 않았다. 두우쟁이는 2005년 멸종위기 야생동물보호법 제정 시 해제되었으며, 현재는 국외반출 승인대상 생물자원으로 분류되고 있다. 국외반출 승인대상 생물자원이란 생물다양성의 보전을 위하여 보호할 가치가 높아 국외로 반출할 경우 승인을 얻어야 하는 생물자원을 의미한다(Yoon, 2013). 준설은 수체 내 탁도를 급격하게 높이는 건설공사이기 때문에 어류에 대한 고려는 반드시 필요하다고 판단되어 멸종위기 야생생물은 아니지만 국외반출 승인대상 생물자원인 두우쟁이를 어류의 대표 종으로 선정하였다. 그 외에 2가지 이상 멸종위기 야생생물이 발견된 생물 중에서 양서류는 금개구리(*Pelophylax chosonicus*), 조류는 저어새(*Platalea minor*)를 대상으로 하였다. 양서류는 금개구리와 맹꽁이 2종의 서식이 확인되었는데, 두 종 모두 성장단계에 해당하는 생활사가 유사하여 금개구리를 선정하였으며, 조류는 조사 시 상대적으로 개체수가 많이 확인된 물새류에서 멸종위기 야생생물인 저어새를 선택하였다. 그 외 무척추동물, 파충류, 포유류는 각각 한 종씩 서식이 확인된 붉은발말뚝개(*Sesarmops intermedius*), 구렁이(*Elaphe schrenckii*), 삿(*Felis bengalensis euptilura*)을 환경창 대상 생물종으로 선택하였다.

각 생물 종의 성장단계는 NIBR (2012a; 2012b; 2012c; 2012d)과 Kim (1973), Jeong, Kim, Yu, et al. (2016)을 참고하여 정리하였다(Table 2). Table 2에서 공란은 성장단계에 대한 조사 및 연구 결과가 존재하지 않아 특별한 성장단계에 해당하지 않는다고 판단하였다. 따라서 성장단계에 대한 등급은 산란기, 성장기, 수면기, 특별한 성장단계가 없는 시기, 이주기로 구분하고, 위와 같은 순서대로 등급을 부여하였다(Table 2).

Table 2. Growth Stage of Target Environmental Windows Species

Month	Invertebrates		Fish		Amphibian		Reptilia		Mammal		Bird	
	<i>Sesarmops intermedius</i>		<i>Saurogobio dabryi</i>		<i>Pelophylax chosonicus</i>		<i>Elaphe schrenckii</i>		<i>Felis bengalensis euptilura</i>		<i>Platalea minor</i>	
	GS	GSG	GS	GSG	GS	GSG	GS	GSG	GS	GSG	GS	GSG
Jan.	W	2		2	W		W	2		3	M	3
Feb.	W	2		2	W	4	W	2		3	M	3
Mar.	G	2		2	W	4	W	2	B	1		2
Apr.	G	2	S	1	W	4		3	B	1	S	1
May	G	2	S	1	S	1		3	B	1	S	1
Jun.	G	2		2	S, G	2		3	G	2		2
Jul.	G	2		2	G	3	S	1	G	2		2
Aug.	S	1		2	G	3	S	1	G	2		2
Sep.	S	1		2	G	3	S	1		3		2
Oct.	G	2		2	W	4		3		3		2
Nov.	W	2		2	W	4	W	2		3		2
Dec.	W	2		2	W	4	W	2		3	M	3

GS: Growth stage, GSG: Growth stage grade, S: spawning season, W: winter sleep period
W: winter sleep period, G: growth season, B: breeding season, M: migration season

4. 결과 및 분석

4.1 한강 하구의 개별 환경창 개발

개별 환경창은 각 생물 분류군에 따라 선정된 환경창 대상 생물에 대한 환경창으로서 각 생물 분류군에 따른 성장단계에 의해 결정된다. 본 연구에서는 총 6분류군에 해당하는 환경창 대상 생물종을 선정하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 녹색음영에 가까울수록 준설의 부정적인 영향이 상대적으로 적은 work windows에 근접하며, 적색음영에 가까울수록 그 반대인 seasonal restriction에 근접하다.

두우쟁이의 개별 환경창은 조사된 성장단계가 산란기밖에 없어 환경창 지수가 0.0과 1.0만 존재하여 해당 분류군의 생활사에 대한 추가적인 조사와 연구가 필요할 것으로 판단된다. 구렁이를 제외한 생물 분류군에서 산란기와 같이 초기 성장단계를 제외하면 12월에서 1월에 준설의 부정적인 영향이 가장 작은 것으로 나타났다. 구렁이의 경우에는 4~6, 10월이 준설의 부정적인 영향이 가장 작은 것으로 나타났다.

4.2 한강 하구의 통합 환경창 개발

통합 환경창은 한 지역에 다수의 환경창이 수립됨으로서

work windows를 선정하기 어려워지는 단점을 개선하기 위하여 환경창 지수에 가중치를 적용하여 구성한다. 가중치는 각 분류군별 특성을 고려하여 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 준설이 하천에서 이루어지는 점을 감안하여 대상 생물의 서식처와 생활사에 따라 수서생물과 육상생물, 수역과 육역을 오가는 생물로 구분하여 준설의 영향정도를 구분하고 가중치를 산정하였다. 가중치를 산정하기 위하여 수서생물인 무척추동물과 어류가 준설의 부정적인 영향을 가장 크게 받으며, 다음으로 양서류, 파충류, 포유류, 조류 순으로 등급을 부여하였다. 가중치는 등급을 역수로 환산한 후 전체 중요도에 대한 비율 값으로 산정하였다 (Table 4).

가중치를 적용하여 통합 환경창을 구성한 결과, 환경창 지수는 0.41~0.93 사이에 분포하는 것으로 나타났다(Table 5). 그 중에서 1~2월, 12월이 환경창 지수가 0.93으로 준설의 부정적인 영향의 강도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 5월의 환경창 지수는 0.27로 가장 낮게 산정되어 준설의 부정적인 영향의 강도가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대부분의 생물 종이 3월부터 9월 사이에 산란기를 갖으며 가중치의 비중이 큰 생물 분류군의 개별 환경창 지수가 낮게 산정된 영향으로 판단된다.

Table 3. Individual Environmental Windows of Han River Estuary

Target EWs species	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
<i>Sesarmops intermedius</i>	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00
<i>Saurogobio dabryi</i>	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>Pelophylax chosonicus</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.33	0.67	0.67	0.67	1.00	1.00	1.00
<i>Elaphe schrenckii</i>	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.50
<i>Felis bengalensis euphilura</i>	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>Platalea minor</i>	1.00	1.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00

Table 4. Calculation Result of Weight Factor

EWs species		Grades for negative impact of dredging	Weight factor
Invertebrates	<i>Sesarmops intermedius</i>	1	0.273
Fish	<i>Saurogobio dabryi</i>	1	0.273
Amphibian	<i>Pelophylax chosonicus</i>	2	0.136
Reptilia	<i>Elaphe schrenckii</i>	2	0.136
Mammal	<i>Felis bengalensis euphilura</i>	4	0.091
Bird	<i>Platalea minor</i>	4	0.091
Sum		14	1.000

Table 5. Integrated Environmental Windows of Han River Estuary

Integrated EWs	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Han river estuary	0.93	0.93	0.66	0.41	0.27	0.68	0.59	0.45	0.50	0.82	0.89	0.93

Table 6. Integrated Environmental Windows Considering Flood and Freezing Season

Integrated EWs	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Han river estuary	Fr	Fr	0.66	0.41	0.27	0.68	Fl	Fl	Fl	0.82	0.89	0.93

Fr: freezing season, Fl: flood season

4.3 한강 하구의 최적 친환경 준설시기 분석

통합 환경창은 생태계에 준설이 미치는 영향을 최소화하기 위해 준설시기를 결정하기 위해서 수립하였다. 그러나 생태계 외에도 홍수기와 결빙기 같은 환경변화는 준설시기에 많은 영향을 미치게 된다. 일반적으로 홍수기에는 준설보다는 수문을 이용한 토사토출이 유사제거에 더 효율적이며 준설장비의 계류 및 안전 측면에서 위험이 높기 때문에 준설을 수행하는데 어려움이 있다. 또한 결빙기는 준설장비의 운용이 어렵기 때문에 홍수기와 결빙기를 제외하고 통합 환경창을 재수립하였다(Table 6).

그 결과 준설의 부정적인 영향의 강도가 가장 낮을 것으로 예상되는 시기는 환경창 지수가 가장 높게 산정된 12월로 나타났으며, 12월에는 구렁이를 제외한 다른 생물 분류군에서 특별한 성장단계를 보이지 않은 것이 주요 원인으로 판단된다. 12월 다음으로 11월의 환경창 지수가 가장 높게 산정되었으며, 12월과 동일한 환경창 지수를 나타낸 1월과 2월은 결빙기에 포함되어 준설시기에서 제외되었다. 따라서 1개월 준설을 수행할 경우에는 12월에 준설을 수행하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단되며, 2개월 준설 시에는 11월에 시작하여 12월에 마무리하는 것이 최적일 것으로 판단된다. 하천 유지·보수 매뉴얼(MLTM, 2012)에서는 저수로 준설 시기를 홍수기 이전과 이후로 규정하고 있으나, 이는 준설공사에 대한 용이성과 효율성만을 고려하고 생태계를 고려하지 못한 결과로 판단된다. 본 연구에서도 홍수기 이전에는 다양한 생물 분류군이 산란기 및 성장기와 같이 중요한 성장단계를 보여 환경창 지수가 10~12월에 비해 상당히 낮게 산정되었다. 따라서 생태계 및 환경 등을 고려하여 매뉴얼을 개선할 여지가 있을 것으로 판단된다.

또한 3개월 이상의 준설이 필요한 상황, 가뭄이나 하천 결빙이 없는 상황이 발생하는 경우에는 Table 6보다는 Table 5를 이용하여 준설시기를 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 하천 결빙이 발생하지 않는다면 12월부터 2월까지 준설하는 것이 준설의 부정적인 영향의 강도가 가장 작은 것으로 판단된다. 홍수기의 경우에는 환경창 지수가 상대적으로 낮기 때문에 가뭄 상황이라 하더라도 생태계 보호를 위해서는 홍수기 준설은 피하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

5. 결 론

최근 남북공동수로조사를 통해서 한강하구 준설에 대한

관심이 증가하고 있다. 준설은 사회·환경적으로 부정적인 영향의 강도가 큰 건설공사로 알려져 있으며, 이에 따른 대책이 준설계획 수립 시 고려되어야 한다. 더욱이 한강하구는 환경부에서 지정한 습지보호지역이면서 하굿둑이나 방조제가 없이 열린 하구이다. 열린 하구의 특성상 기수역을 넓게 형성하여 생태적으로 보존가치가 높은 지역으로 다양한 멸종위기 야생생물이 서식하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 상충된 상황에서 생태계에 미치는 준설의 부정적인 영향을 최소화하기 위해 환경창을 이용한 친환경 준설시기를 산정하였다. 환경창 수립에 적용된 생물 분류군은 무척추동물, 어류, 양서류, 파충류, 포유류, 조류와 같이 6분류군으로 어류를 제외한 나머지 분류군은 모두 멸종위기 야생생물을 고려하였다. 또한 홍수기와 결빙기 같이 준설이 부적절한 상황에 대해서도 함께 고려하여 친환경 준설시기를 제시하였다. 그 결과, 12월이 환경창 지수가 가장 낮게 산정되어 준설의 부정적인 영향의 강도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었으며, 2개월 이상 준설 시에는 11~12월에 준설을 하는 것이 생태계 교란을 최소화할 수 있는 방안으로 판단된다. 본 연구에서는 생물 분류군이 서식처 형태를 고려하여 가중치를 산정하였으나 추후 연구에서는 AHP 등과 같이 다양한 분야의 전문가와 민간의 자문을 받아 가중치를 산정하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 또한 현재 많은 생물 분류군의 생활사에 대한 조사나 연구가 많이 이루어지지 않아 시기별로 자세하게 분류된 환경창을 수립하는데 어려움이 있었으며 추후 위와 같은 부분에 대한 보완 및 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 환경창을 통해서 제시된 친환경 준설시기에 준설을 수행하더라도, 생태적 가치가 높은 한강하구와 같은 지역에서는 탁도 등과 같은 교란요소를 최소화할 수 있는 준설 장비 및 공법을 이용하려는 노력도 필요하다. 4대강 살리기 사업부터 준설에 대한 부정적인 인식이 증가하고 있는 상황에서 본 연구는 준설의 부정적인 영향을 완화하고 생태계를 고려한 하천공사에 대한 기초자료 제공 및 의사결정 지원 등에 활용될 것으로 판단된다. 또한 사용연한의 노후화가 예상되거나 유사의 지속적인 유지·관리가 필요할 것으로 판단되는 댐이나 다기능보, 하구둑, 사방댐 등을 대상으로 준설의 필요성을 검토해야 하는 시기에 미래를 준비하는 장기적인 안목이 요구되는 시점이라 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 충남대학교 학술연구비와 환경부의 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(79610).

References

- Adrichem, H.L.A. (2013). *Quantification of uncertainty and spatial distribution of the maintenance dredging on the Waal*. Master's thesis, Delft University of Technology.
- Dickerson, D.D., Reine, K.J., and Clarke, D.G. (1998). *Economic impacts of environmental windows associated with dredging operations*. DOER Technical Notes Collection, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Herbich, J.B. (2000). *Handbook of dredging engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Jeong, A. (2018). *Development of decision support system for river dredging by river morphodynamic considering hydraulic structure operation*. Ph.D. dissertation, Chungnam National University (in Korean).
- Jeong, A., Kim, S., Kim, M., and Jung, K. (2015). Environmental windows setting method for environmental-friendly river dredging in Nakdong river basin. *Journal of Environmental Policy*, Vol. 14, No. 4, pp. 45-61 (in Korean).
- Jeong, A., Kim, S., Kim, M., and Jung, K. (2016). Development of environmental windows index for environmental-friendly dredging. *Proceedings of the 2016 Spring Meeting*, the Korean Environmental Dredging Society, Seoul, Korea, pp. 49-62 (in Korean).
- Jeong, A., Kim, S., Yu, W., Kim, M., and Jung, K. (2016). Estimation of environmental friendly dredging season at multi-functional weirs by environmental windows. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 339-348 (in Korean).
- Kim, H. (1973). *Korean animal and plant illustration* (in Korean).
- K-water. (2012). *Dam operational practices handbook* (in Korean).
- Lee, C.-W., Kwon, Y.-T., and Yun, J.-H. (2004). Development of dredging index for the rational remediation of polluted coastal sediments. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 70-74 (in Korean).
- Ministry of Environment (ME). (2016). *2015 Han River estuary wetland conservation region monitoring* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2012). *River maintenance manual* (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2012a). *Red data book of endangered birds in Korea* (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2012b). *Red data book of endangered amphibians and reptiles in Korea* (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2012c). *Red data book of endangered fishes in Korea* (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2012d). *Red data book of endangered mammals in Korea* (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2005). *2004 Intensive survey of estuarine ecosystem* (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2016). *2015 Monitoring of the Han river wetland protected areas* (in Korean).
- National Wetlands Center (NWC). (2011). *2011 Intensive survey on the wetland protected areas* (in Korean).
- National Wetlands Center (NWC). (2016). *2016 Intensive survey on the wetland protected areas* (in Korean).
- Reine, K.J., Dickerson, D.D., and Clarke, D.G. (1998). *Environmental windows association with dredging operations*.
- Transportation Research Board (TRB). (2001). *A process for setting, managing, and monitoring environmental windows for dredging projects*.
- Wang, Z.B., Jeuken, M.C.J.L., and Kornman, B.A. (2003). A model for predicting dredging requirement in the Westerschelde. *International Conference on Estuaries and Coasts*, pp. 429-435.
- Yoon, I.J. (2013). A legal issue on biodiversity conservation in Korea. *Sogang Law Journal*. Vol. 2, No. 1, pp. 91-125 (in Korean).
- Ning, X., Wang, J., Yang, Z., Liu, J., and Li, L. (2012). Application of calculating methods for the dredging amount in a polluted river. *World Automation Congress 2012, Puerto Vallarta, Mexico*.

Received	February 22, 2019
Revised	February 25, 2019
Accepted	March 12, 2019