

금강에서 횡단구조물의 설치와 운영에 따른 하천 서식처의 경관 특성 변화

Changes in Landscape Characteristics of Stream Habitats with the Construction and Operation of River-Crossing Structures in the Geum-gang River, South Korea

김다나¹ · 이철호² · 김휘래¹ · 옥기영³ · 조강현^{4*}

¹인하대학교 바이오시스템융합학과 석사과정, ²인하대학교 바이오시스템융합학과 박사과정,
³국립생태원 생태평가연구실 선임연구원, ⁴인하대학교 생명과학과 교수

Dana Kim¹, Cheolho Lee², Hwirae Kim¹, Giyoung Ock³ and Kang-Hyun Cho^{4*}

¹Master Student, Department of Biological Sciences and Bioengineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Doctor Student, Department of Biological Sciences and Bioengineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Senior Researcher, Department of Ecosystem Assessment, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea

⁴Professor, Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

Received 22 March 2021, revised 28 March 2021, accepted 29 March 2021, published online 31 March 2021

ABSTRACT: This study was conducted to find out the effect of the construction and operation of river-crossing structures on the habitat landscape characteristics in the Geum-gang River, South Korea. A total of three study reaches were selected in the downstream of the Daecheong Dam: the Buyong-ri reach, which is a control that is not affected by the construction and operation of the weir of the Four Rivers Project and Sejong-bo Weir reach and Gongju-bo Weir reach of the upper and lower sections of each weir that are affected by the weir construction and operation. The habitat type was classified, and then the structural characteristics of the landscape were analyzed using aerial photographs taken before and after the construction of the Daecheong Dam, before and after the construction of the weir, and before and after the weir gate operation. After the construction of Daecheong Dam in Geum River, the area of the bare land greatly decreased, and the area of grassland and woodland increased in the downstream of the dam. In addition, the patch number in the river landscape increased, the patch size decreased, and the landscape shape index and the habitat diversity increased. Therefore, after the construction of the dam, the bare land habitat was changed to a vegetated habitat, and the habitat was fragmented and diversified in the downstream of the dam. After the construction of the weirs, the area of open water increased by 18% in the Sejong-bo reach and by 90% in the Gongju-bo reach, and the landscape shape index of the open water decreased by 32% in the Sejong-bo reach and by 35% in the Gongju-bo reach, and the habitat diversity index decreased to 25% in the Sejong-bo reach and to 24% in the Gongju-bo reach. Therefore, the open water habitat was expanded, the shape of the habitat was simplified, and the habitat diversity decreased according to the construction of the weirs. After water-gate opening of the weir, the bare land that disappeared after the construction of the weir reappeared, and the landscape shape index and habitat diversity index increased in both terrestrial and open water habitats. Therefore, it was found that the landscape characteristics of the river habitats were restored to the pre-construction of the weir by the operation of the weir gate. The effect of weir gate opening was delayed in the downstream than in the upstream of the weir. Although the characteristics of the landscape structure in the river habitat changed due to the construction of the river-crossing structures, it is thought that proper technology development for the ecological operation of the structures is necessary as the habitat environments can be restored by the operation of these structures.

KEYWORDS: Aerial photograph, Dam construction, Landscape analysis, Stream habitat, Weir operation

*Corresponding author: khcho@inha.ac.kr, ORCID 0000-0003-4546-3546

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약: 본 연구에서는 금강에서 횡단구조물의 건설과 운영이 하천 서식처의 경관 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 대청댐 하류에서 보 건설과 운영의 영향을 받지 않는 대조구간인 부용리 구간과 세종보, 공주보의 상하류 구간의 총 3개 하천구간을 선정하여 대청댐 건설 전후, 보 건설 전후, 보 개방 전후로 시기를 구분하여 항공사진을 이용해 서식처를 분류하고 경관의 공간 유형을 분석하였다. 금강에서 대청댐 건설 후 나지의 면적은 크게 감소하고 초지와 임지의 면적은 증가하였다. 또한 하천 경관에서 조각의 수는 증가하고 크기는 감소하였으며 경관형태지수와 서식처 다양성지수는 증가하였다. 따라서 댐 건설이후에 하류에서 나지 서식처가 식생 서식처로 변하였고 서식처가 파편화되고 다양화되었다. 4대강사업에 따른 보 축조의 영향으로 세종보와 공주보 구간에서 개방 수면이 각각 18%, 90%가 증가하였고, 개방수역의 경관형태지수가 각각 32%, 35%가 감소하였으며 서식처 다양도지수가 25%, 24%로 감소하였다. 따라서 보 건설에 따라서 개방수면이 확대되며, 서식처의 형태가 단순화되고 다양성이 감소하였다. 보 개방 후에는 보 건설 후 사라졌던 나지가 다시 나타나고, 육역 서식처와 개방 수면의 경관형태지수와 서식처 다양도지수가 증가하였다. 따라서 보 개방에 의하여 서식처의 경관 특성이 보 건설 이전으로 회복되는 것으로 나타났다. 다만, 보 개방의 효과가 보 하류에서는 보 상류보다 지연되었다. 하천에서 횡단구조물의 건설에 의하여 하천 서식처에서 경관 구조의 특성이 변화하였으나, 이들 구조물의 운영에 의하여 서식처 환경을 회복할 수 있으므로 구조물의 생태적 운영에 대한 체계적인 기술 개발이 필요하다고 생각된다.

핵심어: 항공사진, 보 건설, 경관 분석, 하천 서식처, 보 운영

1. 서론

하천에서 하안지역은 지상에서 가장 다양하고 역동적이며 복잡한 서식처 중의 하나이다. 수변식생의 기반이 되는 이곳은 야생 동물의 먹이와 생물서식공간을 제공할 뿐만 아니라 육역과 수역에 유기물과 무기영양소를 공급하고, 지표유출수로 운반되는 오염물질을 여과하며, 제방을 침식으로부터 보호하는 등의 중요한 역할을 수행하고 있다 (Pinay and Decamps 1988, Naiman et al. 1993, Dosskey et al. 2010).

우리나라에서는 1970년대 이후 이수과 치수의 목적으로 하천정비사업이 활발하게 진행되었다. 이 과정에서 하상정비, 댐과 보 등의 횡단 구조물과 제방 등의 종단구조물의 축조, 친수시설 조성 등으로 하천의 물리적인 구조가 크게 변하여 하천생태계가 교란되어왔다. 하천에서 이러한 물리적 구조의 변화와 교란은 경관 특성을 변화시키고, 하천 내부와 인접 생태계에서 생물다양성에 영향을 미쳤다. 특히, 댐과 보와 같은 횡단구조물의 건설은 하천의 종적 연속성을 저하시켜서 어류를 포함한 다양한 생물의 이동과 자연적 유사의 이송을 방해하고, 하천 지형과 하안 서식처의 환경을 변화시킨다 (Im et al. 2020, Jang and Shimizu 2010). 특히 홍수 조절용 댐 건설은 홍수량을 평활화하여 댐 하류에 망상유로를 형성하고 사주에 식생 유입을 촉진시켜 하천 생물 다양성에 영향을 미쳤다 (Woo et al. 2010).

4대강 중의 하나인 금강에서는 1972년부터 1981년

까지 제1차 국토종합개발계획으로 4대강유역 종합개발사업이 시행되었다. 이 사업에 의하여 우리나라에서 세번째로 큰 규모의 다목적 댐인 대청댐이 건설되었다. 그후 2008년부터 2012년까지 4대강살리기사업의 일환으로 금강정비사업이 시행되었다. 금강정비사업에 의하여 금강에 3개의 다기능 보가 설치되었고, 하상이 준설되었으며 자전거도로 등의 친수시설이 조성되었다 (CNI 2017). 그러나 4대강살리기사업 이후에 녹조 발생, 물고기 집단 폐사, 남조류 독소 발생, 멸종위기생물 서식 위협, 철새 도래 개체수 감소 등의 많은 생태학적 문제가 발생하였다 (Jeon et al. 2013, Lee et al. 2018). 이러한 생태, 환경 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로써 2017년 6월부터 금강 수계에 설치된 보의 수문을 부분 또는 완전 개방하여 운영하고 있다. 보 개방 이후에 금강에서는 다양한 지형적, 생태적 변화가 보고되고 있다 (MOE 2020).

하천의 홍수터와 사주에는 나지, 초지, 임지, 연못 등의 다양한 생물서식처로 구성된 고유한 경관 (landscape) 이 형성된다. 경관의 구성요소는 크게 바탕 (matrix), 조각 (patch) 및 통로 (corridor)로 구성된다 (Turner 1989). 경관에서 바탕은 가장 넓고 연결성이 좋으며, 조각은 시각적, 생태적 특징이 바탕과 구별되는 면적 요소이고, 통로는 선형의 요소이다 (Turner 1989). 하천 경관에서 이러한 경관 요소의 구성과 분포는 횡단구조물의 축조와 수문 조절에 의하여 영향을 받을 수 있다 (Jansson et al. 2000). 4대강사업에 의한 보가 축조된 후에 모래 사

주의 면적 감소와 같은 경관요소의 구조적 변화가 뚜렷이 나타났다 (Im et al. 2015). 금강에서는 세종보의 건설 및 수문 개방이 서식처 분포에 큰 변화를 초래하였는데, 특히 수문 개방 후에 서식처의 다양도가 크게 증가하였다 (Ock et al. 2020). 그러나 하천 서식처에서 댐, 보와 같은 횡단구조물의 건설과 수문 조절이 경관의 구조적 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 부족하다.

본 연구에서는 금강에서 횡단구조물인 대청댐과 4대강 보의 건설과 운영이 하천 서식처에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 하천의 육역 서식처를 중심으로 주요 생물 서식처를 분류하고, 1960년대 이후 서식처의 분포 변화와 경관의 구조적 특성을 분석하였다. 본 연구의 목적은 1) 대청댐과 4대강 보 건설에 따른 수문적 변화 특성을 파악하고, 2) 대청댐 하류와 보 상하류 구간에서 횡단구조물의 축조에 따른 서식처 유형 분포와 구조적 경관 특성의 변화를 규명하며, 3) 보 수문 개방 운영에 따른 서식처의 변화를 추적하여, 4) 하천에서 횡단구조물이 생물 서식처의 구조적 특성에 미치는 영향을 파악하는데 있다.

2. 연구 방법

2.1 조사지 개황

본 연구의 조사지는 전북 장수군 장수읍 수분리 신무산에서 발원하여 충북과 대전, 세종, 충남을 지나 금강 하구둑을 거쳐 서해로 유입된다. 이 하천의 하천연장은 398 km이고, 유역면적은 9,912 km²이다 (MLTMA 2011). 이 하천에 위치한 대청댐 하류 하천의 하상은 모래가 우세하였다.

금강은 산업화에 따라서 하천의 구조가 지속적으로 변경되어 왔다. 금강에서는 1972년부터 1981년까지 제1차 국토종합개발계획의 일환으로 4대강유역종합개발사업이 시행되었다. 이 사업에 의하여 1980년에 금강 하구로부터 150 km 상류에 위치한 곳에 다목적댐인 대청댐이 축조되었다. 대청댐은 유역면적이 금강 유역의 42%인 4,189 km²이고, 만수면적이 73 km², 유효저수량이 790백만 m³, 홍수조절용량이 250백만 m³이다 (MLTMA 2011).

그 후 2008년부터 2012년까지 4대강살리기사업의 일환으로 금강정비사업이 시행되었다. 이 사업으로 금

강에는 2012년에 세종보, 공주보, 백제보 총 3개의 가동보가 설치되었으며, 하상을 준설하고 자전거 도로 등의 친수시설이 조성되었다. 세 개의 보 중 가장 상류에 위치한 세종보는 2012년 6월에 준공되었다. 세종보는 높이 4.8 m, 길이 360 m (Kwak et al. 2017)로 대청댐에서 하류 방향으로 36 km, 금강 하구둑에서 상류 방향으로 101 km 떨어진 지점에 위치하고 있으며 관리수위는 11.80 m이다 (Jeong et al. 2018). 세종보로부터 하류로 19 km 떨어진 곳에 위치한 공주보는 2012년 7월에 준공되었으며 높이는 7.0 m, 길이는 280 m이고, 관리수위는 8.75 m이다 (Jeong et al. 2018). 세 개 보 중 가장 하류에 위치한 백제보는 하구둑의 55 km 상류에 위치하며 2012년 6월에 준공되었다. 백제보의 높이는 7.2 m, 길이는 311 m이고, 관리수위는 4.20 m이다 (Kim et al. 2019). 2012년 보 설치 이후 유수의 흐름이 정체되어 하천 고유의 생물서식처가 교란되는 생태문제가 야기되었으며 이러한 문제에 대처하기 위하여 2017년부터 보 개방을 실시하였다 (MOE 2020).

본 연구 지역은 금강에서 대청댐과 3개 보의 건설 및 운영의 영향을 파악하기 위하여 대청댐 하류 지역에 세 개 구간을 선정하였다 (Fig. 1). 특히 보의 영향을 파악하기 위하여 보 건설 및 운영에 영향을 받지 않는 대조구간(부용리)과 보의 영향을 받는 두 구간(세종보, 공주보)을 선정하였다. 부용리 구간(Site 1)은 세종시 금남면 부용리에 위치하며 길이는 3.5 km, 하폭은 300 m - 700 m로 상류부와 하류부보다 중류부에서 넓어지며 곡류하는 특징을 가지고 있다. 이 곳의 우안으로는 지

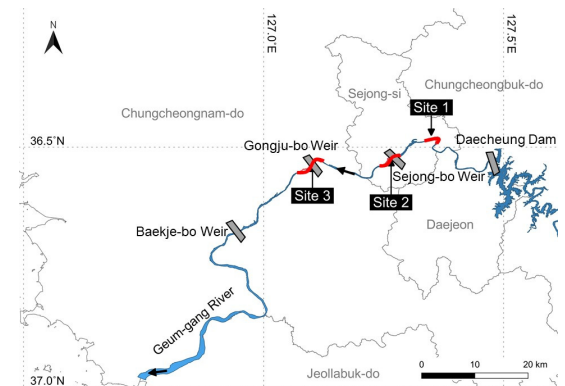


Fig. 1. Map showing the study sites in the Geum-gang River, South Korea. Red solid line indicates the study sites (Site 1 = Buyong-ri, Site 2 = Sejong-bo, Site 3 = Gongju-bo).

류인 백천이 유입되고 있다. 보 축조와 수문 운영에 의하여 영향을 받는 세종보 구간(Site 2)은 세종시 연기면에 위치한 세종보의 상하류 약 4.6 km 구간이다. 이 구간으로 지류하천인 제천, 용수천, 대교천이 합류한다. 하폭은 600 m - 700 m의 범위이며, 대교천 합류점에서 일시적으로 하폭이 줄어든다. 또 다른 보 구간인 공주보 구간(Site 3)은 충남 공주시 우성면에 위치한 공주보의 상하류 약 5.7 km 구간이다. 이 구간으로 지류하천인 도천과 유구천이 유입한다. 이 곳의 하폭은 400 m - 600 m의 범위이다. 선정된 조사구간에서 서식처 유형 분석은 제방사면을 제외한 제방 사이의 제외지로 한정하였다. 한편 백제보는 금강 하구둑의 수위 영향을 받기 때문에 보 수문 운영의 영향이 적어 본 연구의 조사지에서 제외하였다.

2.2 조사 방법

대청댐 건설 전후의 유황 변화를 파악하기 위하여 1962년부터 2020년까지 공주시(금강교) 수위관측소의 유량을 수집하였다. 이 관측소는 대청댐에서 하류 약 50 km, 공주보에서 상류 약 3 km가 떨어진 충남 공주시 금성동 금강교에 위치하고 있다. 이 지점의 1962-1999년까지의 유량은 금강유역조사 수리수문조사 보고서에 제시된 수위-유량관계 곡선식을 이용하여 수위로부터 유량을 산정하였다(MOCT 2006). 특히 1997년의 유량은 한국수문조사연보(MLIT 1997)에서 산정된 유량을 참고하였다. 2000년부터 2020년까지의 유량은 물환경정보시스템에서 제공하는 자료를 이용하였다(MOE 2021). 한편 수위 측정 결측일이 많은 1964, 1965, 1989, 2011 및 2012년의 유량은 포함하지 않았다. 또한, 보 구간에서 수문 운영에 따른 수위 변화를 파악하기 위하여 2017년 6월 1일부터 2020년 12월 31일까지 세종보와 공주보의 자료를 수집하였다(MOE 2021).

선정된 조사구간에서 서식처 유형 변화를 파악하기 위하여, 조사시기를 대청댐 건설 전후, 보 건설 전후 및 보 개방 전후로 나누었다. 특히 보 개방 후의 수문 운영 영향을 파악하기 위하여 특성이 다른 2개년도의 데이터를 비교 분석하였다. 서식처 조사에 필요한 항공사진의 이용가능성을 고려하여, 대청댐 건설 전인 1966년 또는 1968년과 댐 건설 후인 2002년, 보 건설 전인 2007년과 보 건설 후인 2014년, 그리고 보 수문 개방 전인

2016년, 보 개방 후인 2018년과 2020년을 조사연도로 선정하였다.

금강 횡단구조물 조성과 운영에 따른 서식처 변화는 항공사진을 이용하여 조사하였다(Table 1). 1966년부터 2007년까지의 자료는 아날로그 항공사진이며, 2012년부터 2018년까지는 디지털 항공사진이었다(NGII 2020). 항공사진의 해상도는 0.25 m - 0.53 m 이었고, 2020년 항공사진은 9월 14 - 18일에 무인항공기(Phantom 4 pro, DJI, China)를 이용하였다. 드론 사진은 고도 150 m 및 사진 중첩률 75%로 촬영되었다. 촬영된 항공사진은 OpenDroneMap (ODM 2020)을 이용하여 0.5 m 해상도로 정사화하였다. 대조구간인 부용리에서 항공사진을 촬영할 때의 수위(조사구간 안에 위치한 세종시(명학리) 관측소의 자료)는 표고 14.18 m - 14.50 m의 범위로서 수위차가 0.32 m로 유사하였다(Table 1). 세종보 구간에서 보 운영 전후의 수위는 보 개방 전 표고 11.77 m에서 보 개방 후인 2018년 4월에 3.3 m가, 2020년 9월에 3.0 m가 낮았다. 공주보 구간에서 보 운영 전후의 수위는 보 개방 전 표고 8.88 m에서 보 개방 후인 2018년 4월에 4.5 m가, 2020년 9월에 4.9 m가 낮았다.

금강 조사구간에서 육역 서식처 유형의 분류는 서식처의 생태적 가치와 항공영상에서의 식별 가능성을 고려하여 결정하였다(Table 2). 먼저 하천 제외지를 수역 및 육역인 고수부 및 사주, 하중도로 구분하였다. 하중도는 사주가 수역에 의하여 고수부와 분리된 지형이다. 고수부 및 사주와 하중도는 다시 나지, 초지, 임지, 농지 및 인공지로 분류하였다. 인공지는 도로, 건축물, 포장 지역, 인공나지 등을 포함한다. 분류한 서식처 유형은 항공사진을 이용하여 육안으로 식별하여 지도화하였다. 나지는 모래톱과 같이 식생이 분포하지 않는 곳으로서 항공사진에서 백색에 가까운 색상으로 구분되었다. 초지는 갈대, 달뿌리풀 등의 초본식생이 분포하는 곳으로서 흑백사진에서는 회백색으로 천연색사진에서는 흐린 녹색으로 구분되고 수목의 수관이 형성되지 않는 곳이었다. 임지는 주로 버드나무류가 분포하는 관교목림으로서 보다 짙은 회색 또는 녹색이고 수관이 뚜렷하여 식별이 가능하였다. 항공사진에서 분류된 서식처 유형의 경계를 따라 서식처 유형도를 작도하였다. 이때 서식처의 분포 면적이 5 m × 5 m 이하이거나 폭이 5 m 이하인 곳은 표시하지 않았다. 지리정보시스템(GIS)

Table 1. Characteristics of aerial photographs used in this study and water level elevation at the photographing date

Management event	Pre / Post	Content	Study site		
			Buyong-ri	Sejong-bo	Gongju-bo
Daecheong Dam construction	Pre	Date of photographing	Fall 1968*	Fall 1968*	Sep. 20 - 23, 1966
		Image resolution (m)	0.28	0.28	0.53
		Water level (m EL.)	-	-	14.36
	Post	Date of photographing	Nov. 27, 2002	Nov. 27, 2002	Nov. 27, 2002
		Image resolution (m)	0.42	0.42	0.42
		Water level (m EL.)	14.19	-	-
Weir construction	Pre	Date of photographing	Dec. 05, 2007	Dec. 24 -26, 2007	Nov. 27, 2007
		Image resolution (m)	0.42	0.42	0.42
		Water level (m EL.)	14.32	-	-
	Post	Date of photographing	May 31, 2014	May 21 -22, 2014	May 22, 2014
		Image resolution (m)	0.25	0.25	0.25
		Water level (m EL.)	14.18	11.81	8.77
Weir gate opening	Pre	Date of photographing	May 21, 2016	May 21, 2016	May 21 -22, 2016
		Image resolution (m)	0.25	0.25	0.25
		Water level (m EL.)	14.36	11.77	8.88
	Post-1	Date of photographing	Apr. 29, 2018	Apr. 21, 2018	Apr. 21, 2018
		Image resolution (m)	0.25	0.25	0.25
		Water level (m EL.)	14.50	8.47	4.35
	Post-2	Date of photographing	Sep. 18, 2020	Sep. 17, 2020	Sep. 14, 2020
		Image resolution (m)	0.50	0.50	0.50
		Water level (m EL.)	14.32	8.81	4.03

*estimated.

Table 2. Classification of riparian habitats for the study in the Geum-gang River

Habitat type		Description	Major ecological function
Water	Open water	Water surface not covered with plants.	Habitats of aquatic wildlife.
Floodplain & bar	Bare land	Terrestrial land not covered with plants in floodplain and bar.	A key interface between aquatic and terrestrial ecosystems and also habitat of endangered wildlife such as long-billed ringed plover and <i>Eremias argus</i> .
	Grassland	Land covered with grass and forb in floodplain and bar.	A source of food and shelter for various species such as otter and great reed warbler.
	Woodland	Land covered with trees or shrubs in floodplain and bar.	Provider of food and habitat for many insects and birds.
	Agricultural land	Land devoted to agriculture.	-
	Artificial land	Land used for road, facility for the recreation and management, etc.	-
Island	Bare land	Isolated land not covered with plants on the island.	Habitat of wildlife and shelter from the human disturbance.
	Grassland	Isolated land covered with grass and forb on the island.	Habitat of wildlife and shelter from the human disturbance.
	Woodland	Isolated land covered with trees or shrubs.	Habitat of wildlife and shelter from the human disturbance.

에서 생성한 서식처 유형은 벡터 형식의 파일로 저장하였다. 경관 분석을 위하여 이 벡터 파일은 ArcGIS 10.3 (ESRI, ArcGIS 10.3)을 이용하여 TIF 래스터 파일로 변환하였다. 이때 서식처 형태 왜곡을 고려하여 래스터 파일의 입도 크기는 3 m × 3 m로 설정하였다.

2.3 자료 분석

금강에서 대청댐 축조 전후의 유량 변화를 파악하기 위하여 평균대비 이상치 (anomaly)를 계산하였다. 이상치는 연도별 평균유량과 최대유량에서 각각 1962 - 2020년 사이의 평균값을 빼서 구하였다. 이상치에서 양의 값은 해당 연도의 연평균 유량 또는 연최대유량이 최근 약 60년간의 각각의 평균치보다 높다는 것을 의미하고, 음의 값은 그보다 낮다는 것을 의미한다.

래스터 파일로 변환된 서식처 유형 지도를 이용하여 FRAGSTATS 4.2 (McGarigal et al. 2012)로 경관분석을 하였다. 사용한 경관분석용 지수는 조각의 수와 평균면적, 경관형태지수(Landscape shape index, LSI) 및 서식처 다양도지수이다. 조각 수는 같은 서식처 유형의 수를 계수하였고, 조각 평균면적은 같은 서식처 유형 조각의 평균면적이다. 경관형태지수는 아래 Eq. 1로 산출하였다 (McGarigal et al. 2012).

$$LSI = 0.25 E / \sqrt{A} \tag{Eq. 1}$$

여기서 A 는 같은 서식처 유형을 갖는 조각의 면적 합 (m^2)이고, E 는 해당 조각의 가장자리 길이 합 (m)이다. 경관형태지수는 특정 서식처의 형태가 복잡한 정도를

나타내는 지수이다. 이 지수는 래스터 자료에서 조각이 정사각형일 때 가장 낮은 값인 1을 가지고 가장자리의 형태가 복잡하고 불규칙할수록 값이 커진다. 서식처 다양도지수는 Shannon의 다양도지수 (Shannon's diversity index, H')를 사용하였다 (McGarigal et al. 2012).

$$H' = - \sum_{i=1}^n (P_i \times \ln P_i) \tag{Eq. 2}$$

P_i 는 전체 경관 중 i 서식처에 의해 점유되는 면적 비율이다. 다양도지수는 서식처 종류가 많아질수록, 각 서식처의 면적이 균등할수록 값이 커진다.

3. 결과

3.1 수문 특성 변화

대청댐 하류에 위치한 공주시 (금강교) 수위측정소에서 1962 - 2020년 연평균유량과 연최대유량의 이상치는 대청댐 축조 이후, 특히 1990년대 이후에 감소하였다 (Fig. 2 (a)). 또한 연평균유량에 비하여 연최대유량의 이상치가 대청댐 건설 이후에 댐 하류에서 감소하였다. 따라서 본 연구 조사지의 상류에 위치한 홍수 조절용 다목적 댐이 건설된 이후에 유량의 연변동폭이 감소한 것으로 판단된다.

조사구간 세종보에서는 2017년 11월에 보의 수문을 부분개방하기 시작하여 보 개방이전에 관리수위인 표고 11.80 m로 유지한 수위가 평균 10.00 m로 낮아졌다 (Fig. 2 (b)). 이후 2018년 1월부터 수문을 완전 개방하여 최저수위인 8.20 m를 유지하고 있다. 또다른 조사구

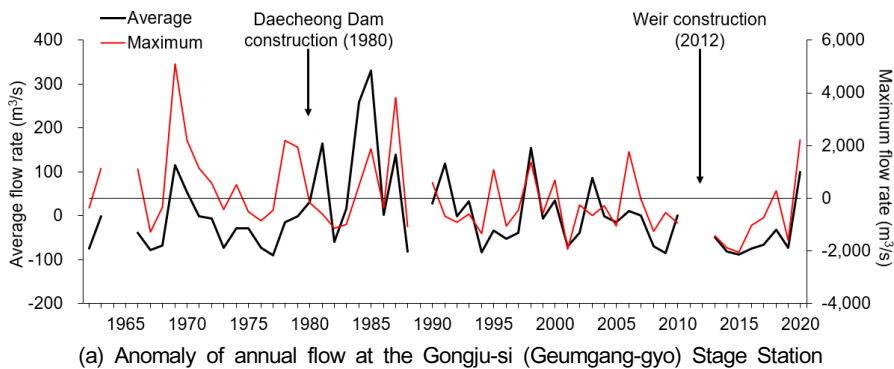


Fig. 2. Changes in the anomaly of annual flow rate at the Gongju-si (Geumgang-gyo) Stage Station (a) and water level elevations of the Sejong-bo Weir (b) and the Gongju-bo Weir (c) in the Geum-gang River. The Gongju Stage Station is located 50 km downstream of the Daecheong Dam. Data of 1964, 1965, 1989, 1997, 2011 and 2012 are missing.

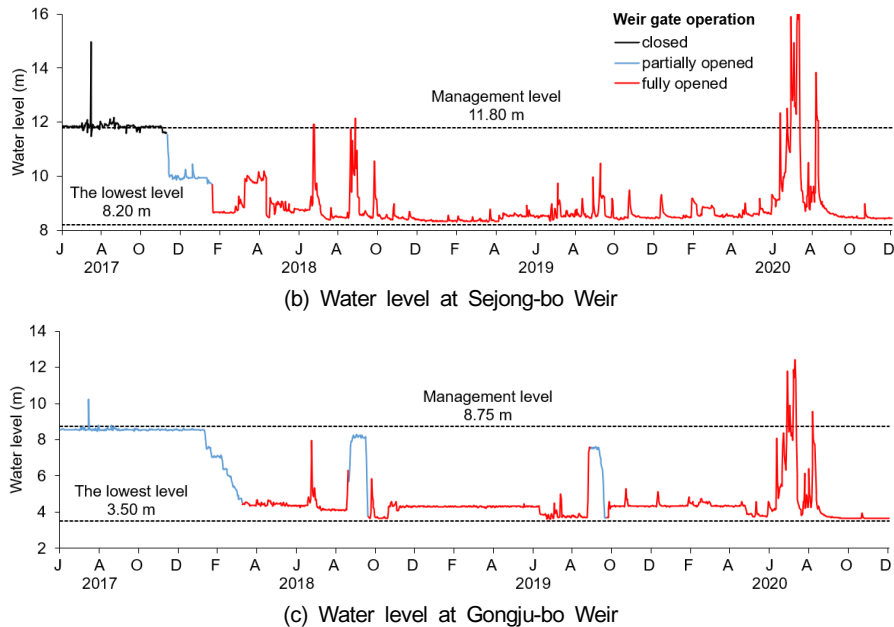


Fig. 2. Continued.

간인 공주보에서는 2017년 6월에 부분개방을 시작하여 관리수위인 8.75 m 보다 약간 낮은 8.55 m로 수위를 유지하였다 (Fig. 2 (c)). 그후 2018년 1월부터는 단계적으로 수위를 낮춰 2018년 3월에 완전 개방하여 수위를 4.50 m로 유지하였다. 공주보에서 수문을 완전 개방하여도 최저수위인 3.5 m에 도달하지 못한 것은 하류에 위치한 백제보가 수문을 완전 개방하지 않아서 그 영향을 받았기 때문이다. 백제보가 2020년 7월 완전개방한 후에 공주보의 수위는 3.65 m로 더 낮아졌다. 세종보와 공주보의 수위는 수문 개방 정도와 함께 강수에 의한 하천 유량 변화에 의하여 변동을 하였다. 특히 공주보에서는 2018년 8 - 9월과 2019년 9 - 10월에 지역 축제를 위하여 수위를 일시적으로 높게 유지하였다 (MOE 2020).

3.2 서식처 유형의 면적 변화

대청댐 건설 전인 1966년의 부용리와 1968년의 세종보 및 공주보 구간은 모래사주가 발달하여 나지가 육역 서식처 중에서 가장 넓었다 (Figs. 3 and 4). 1966년 또는 1968년에 비하여 댐 건설 후이고 4대강 보 축조 이전인 기간에 육역 서식처 유형의 면적은 2002년까지 나지가 급격히 감소하고 초지가 급격히 증가하였다. 부용리, 세종보 및 공주보 구간에서 나지는 댐 건설 이전에

비하여 각각 101 ha (82%), 78 ha (70%) 및 21 ha (29%)가 감소하였고, 초지는 각각 35 ha (1,024%), 47 ha (322%) 및 75 ha (3,836%)가 증가하였다. 또한 2002년부터 2007년까지는 나지와 초지의 면적 변화는 크지 않았으나 임지의 면적이 점진적으로 증가하였다. 따라서 대청댐 축조 이후에 댐 하류에서 2002년까지 초기에는 나지에 초본식물이 침입하면서 초지로 바뀌었고, 그 후에 초지의 초본이 수목으로 천이가 일어나서 초지가 점차 임지로 바뀌었다고 생각된다.

2012년까지 진행된 4대강사업에 의하여 고수부지에서 농경지가 제거됨에 따라서 3개 조사구간에서 모두 2014년에 제외지 고수부지에서 농지의 면적이 급격히 감소하였다 (Figs. 3 and 4). 또한 고수부지에 친수시설이 도입되면서 인공지가 다소 증가하였다. 4대강 보 축조의 영향을 받지 않는 대조구간인 부용리에서 4대강사업 후에 초지는 급속히 증가하였고 부용리 상류부에서 목본이 산발적으로 발생하여 임지는 완만하게 증가하였다. 보 구간인 세종보와 공주보에서는 보 축조와 저수로 준설에 따른 침수수면의 증가로 개방수면이 각각 18% 및 90%가 증가하였다. 보 축조에 따라서 세종보에서는 농지가 크게 축소되고 이곳에 초지가 형성되었다. 또한 보 축조 2년후인 2014년부터 임지가 크게 증가하였다. 반면에 공주보에서는 보 축조에 의하여 개방

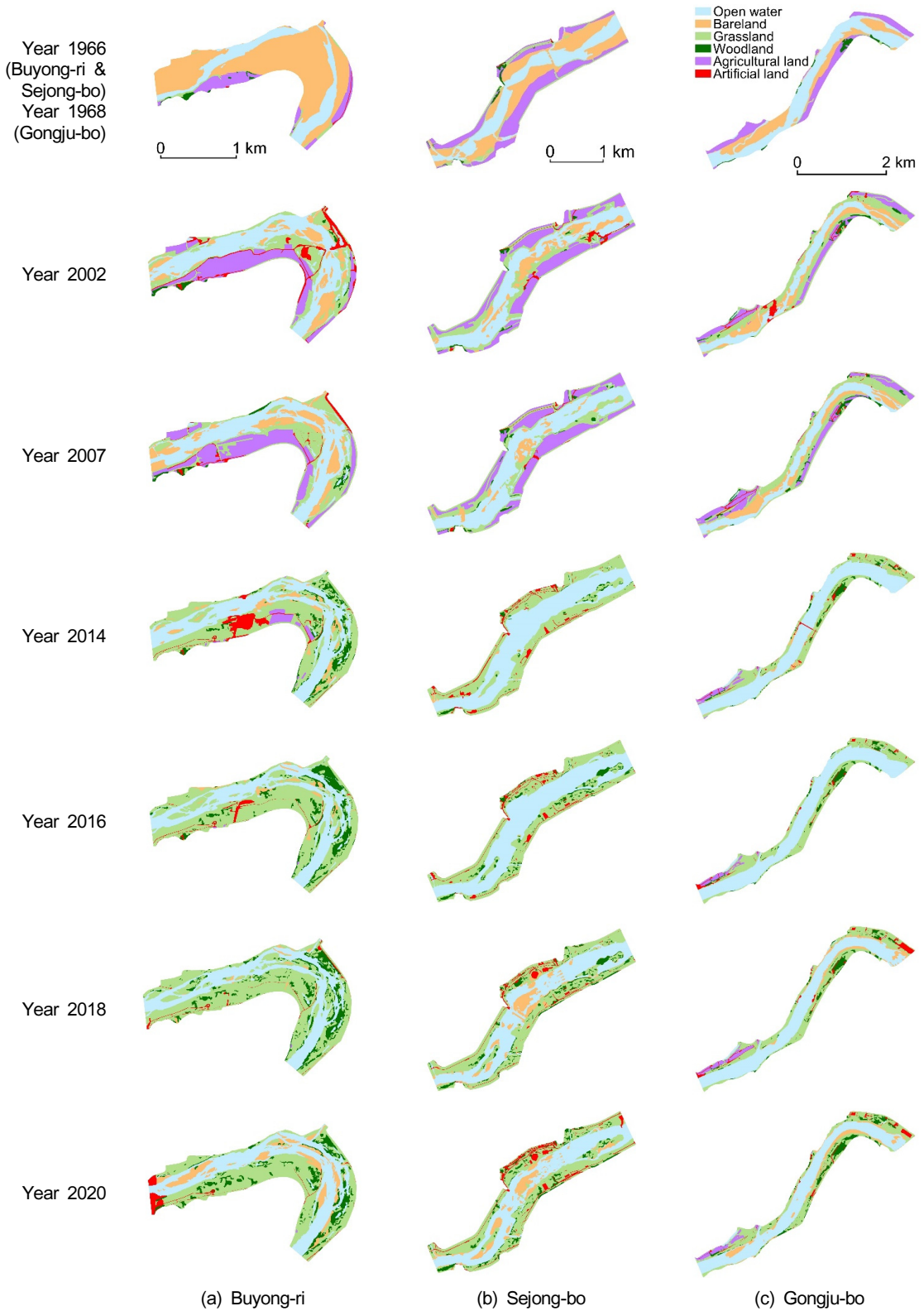


Fig. 3. Changes in riparian habitat types with the construction and management of the river-crossing structures at the study reaches, Buyong-ri (a), Sejong-bo (b) and Gongju-bo (c) in the Geum-gang River.

수면이 크게 증가하였고 초지와 임지는 느리게 증가하였다.

2017년 보 수문 운영에 따른 부분 또는 완전 개방에 의하여 대조구간인 부용리 구간은 보 개방 후 2018년에는 큰 변화를 보이지 않았다. 2020년에는 여름 대홍수

의 영향으로 기존의 일부 초지와 임지 서식처가 사라지고 새로운 나지 서식처가 생성되었다 (Figs. 3 and 4). 반면에 세종보와 공주보 구간에서는 보 수문을 개방한 이후에 개방수면이 감소하고 나지 서식처가 증가하였는데, 특히 세종보에서 크게 증가하였다. 나지를 제외

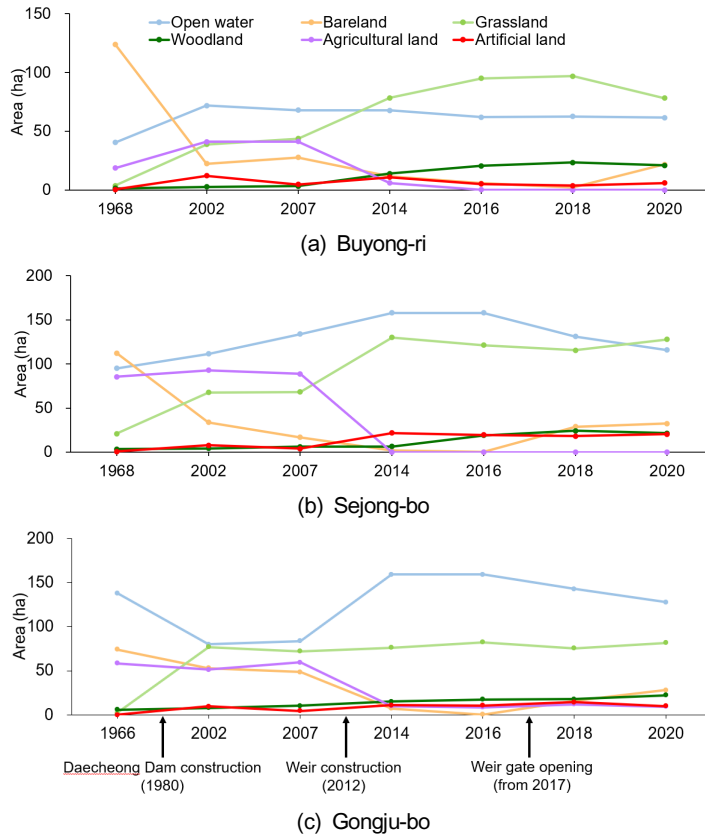


Fig. 4. Changes in area of each riparian habitat with the construction and management of the of river-crossing structures at the study reaches, Buyong-ri (a), Sejong-bo (b) and Gongju-bo (c) in the Geum-gang River.

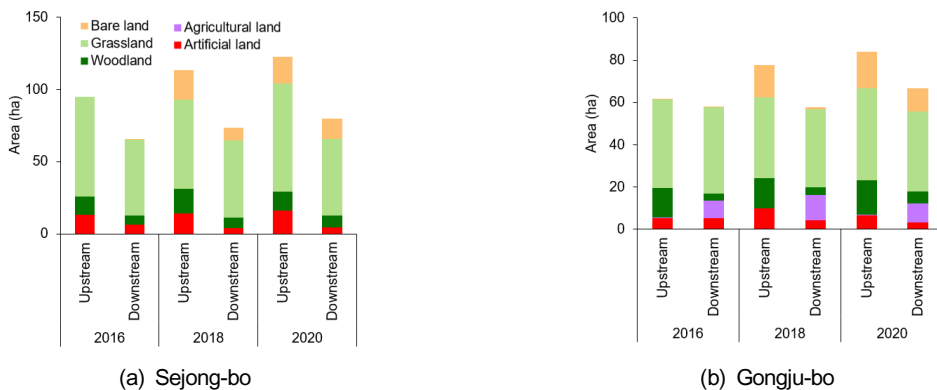


Fig. 5. Changes in area of riparian habitats with the weir gate operation at the upstream and downstream reaches from the weir at the study reaches, Sejong-bo (a) and Gongju-bo (b) in the Geum-gang River.

한 다른 육역 서식처의 면적은 보 개방 후 크게 변화하지 않았다. 보를 기준으로 상하류를 나누어 육역 서식처의 면적 변화를 살펴보면, 세종보와 공주보에서 보 개방 이후 보의 상하류 모두에서 전체 육역 서식처의 면적이 증가하였다 (Fig. 5). 세종보 상류에서는 보 개방 전 나지 서식처가 존재하지 않다가 보를 개방한 직후인 2018년에 나지가 20.4 ha로 급격히 증가하였고, 2020년에는 18.5 ha로 다소 감소하였다. 세종보 하류에서는 보 개방 전 0.1 ha에서 2018년엔 8.5 ha, 2020년에는 14.0 ha로 꾸준히 증가하였다. 공주보 상류에서는 보 개방 전 0.1 ha, 보 개방 후 2018년에 15.3 ha, 2020년에 17.2 ha로 세종보 상류와 마찬가지로 보 개방 직후에 빠르게 증가하였다. 반면에 공주보 하류에서는 보 개방 전 0.3 ha, 보 개방 후 2018년에 0.8 ha, 2020년에 11.0 ha로 보 개방 직후에는 나지 면적의 변화가 크지 않았으나 2020년에 나지가 크게 증가하였다. 따라서 4대강 보 개방에 따른 육역 서식처 유형의 면적은 보 상류가 보 하류보다 빠르게 변화했다.

3.3 서식처 경관 형태 특성 변화

대청댐 건설 후 서식처 경관의 구조적 특징의 변화를 살펴보면, 댐 건설 후 초기에 모든 조사구간에서 각 육역 서식처 유형의 조각 수가 대부분 증가하였다 (Fig. 6). 2002년부터 2007년까지 부용리에서는 초지 조각 수가 감소하였고 세종보와 공주보 구간에서는 초지와 임지의 조각 수가 다소 증가하였다. 서식처 조각의 평균크기는 댐 건설 후 나지 서식처에서는 급격히 감소하고 초지 서식처는 급속히 증가하였으며 임지 서식처에서는 큰 변화가 없었다 (Fig. 6). 특히 부용리 구간에서는 댐 건설 직후 나지 조각의 평균크기가 12.4 ha에서 0.4 ha로 97%가 감소하였다. 댐 건설 후 3개 조사구간에서 모두 육역 서식처와 개방수면의 경관형태지수가 증가하였다 (Fig. 7). 특히 개방수면의 경관형태지수가 급격히 증가하였다. 따라서 대청댐 축조에 의해 댐 하류에서 넓게 분포하던 나지 서식처가 식생이 유입되면서 잘게 쪼개지는 파편화 (fragmentation)가 나타났다. 다만 초

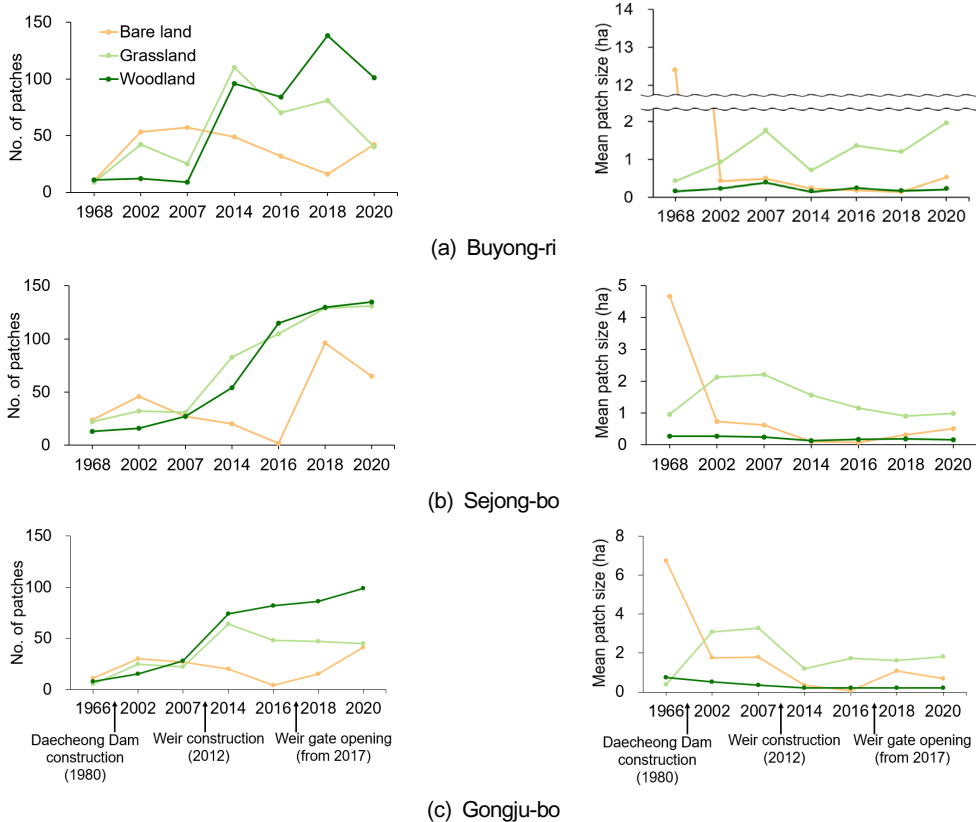


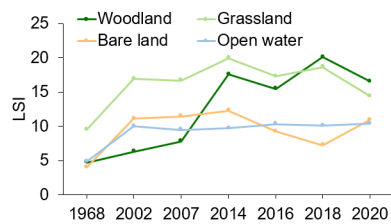
Fig. 6. Changes in numbers and mean size of patches in each habitat type with the construction and management of the river-crossing structures at the study reaches, Buyong-ri (a), Sejong-bo (b) and Gongju-bo (c) in the Geum-gang River.

지에서는 평균크기가 증가하는 경향이였다. 한편 서식처의 다양도지수는 대청댐 건설이후에 부용리, 세종보, 공주보 구간에서 각각 56%, 9%, 36%가 증가하였다 (Fig. 7). 댐 건설 후 하류하천에서 서식처 다양도지수가 증가하는 것은 다양한 크기로 파편화된 나지 서식처에 초본과 목본 식생이 유입되면서 서식처가 더욱 복잡해지기 때문인 것으로 생각된다.

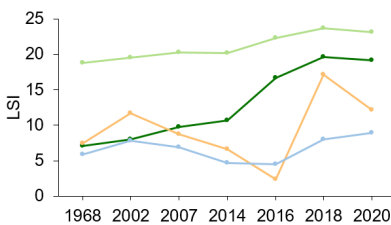
4대강 보 건설 후 부용리, 세종보 및 공주보 구간에서 나지의 조각 수가 감소하였고, 초지 및 임지의 조각 수가 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 6). 또한 육역 서식처 조각의 평균크기는 보 건설 후 감소하는 경향이였다. 대조구간인 부용리 구간에서 보 건설 후에 경관형태지수는 나지, 초지, 임지에서 모두 증가하였다. 반면에 세종보와 공주보 구간에서는 보 건설 후 경관형태지수가 나지에서 감소하고 초지와 임지에서 증가하였다 (Fig. 7). 공주보와 세종보 구간에서 보 건설 후에 개방수면의

경관형태지수는 뚜렷이 감소하였다. 즉 개방수면의 경관형태지수는 세종보가 6.9에서 4.7로, 공주보가 6.9에서 4.5로, 각각 32%와 35%가 감소하였다. 이와 같은 결과는 같은 기간 대조구간인 부용리에서 개방수면의 경관형태지수가 0.2 만큼 증가한 것과 대비되었다. 한편 서식처 다양도지수는 부용리 구간에서 8%가 감소한 것에 비하여 세종보와 공주보 구간에서 각각 25%, 24%가 감소하여, 보 구간에서 대조구간보다 더 크게 감소하였다 (Fig. 7). 따라서 공주보와 세종보 구간에서 보 건설 이후에 사주 나지가 사라지면서 저수로 형태가 단순해졌고, 반면에 초지와 임지 서식처 조각은 더욱 파편화되었다.

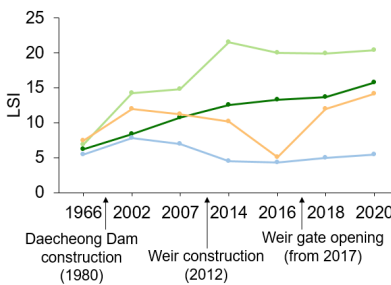
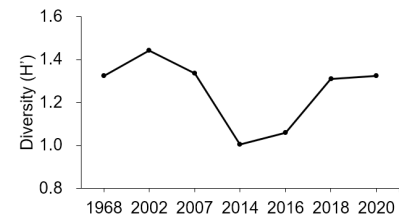
대조구간인 부용리 구간에서는 하류의 보를 개방한 후인 2018년에 나지 서식처에 초본이 유입되고, 기존 초지의 일부에 목본이 산발적으로 출현하면서 임지의 조각 수가 증가하고, 초지 조각의 평균크기가 다소 감



(a) Buyong-ri



(b) Sejong-bo



(c) Gongju-bo

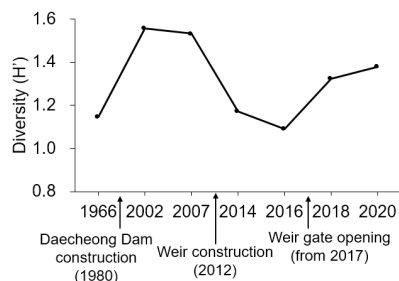


Fig. 7. Changes in landscape shape index (LSI) and Shannon's diversity index (H') of the habitats with the construction and management of the river-crossing structures at the study reaches, Buyong-ri (a), Sejong-bo (b) and Gongju-bo (c) in the Geum-gang River.

소하였다 (Fig. 6). 세종보 구간에서는 보 개방 후 2018년에 나지의 조각 수가 보 개방 전 2개에서 개방 후 96개로 크게 증가하였다. 이후 2020년에 조각 수가 다소 감소하였고 조각의 평균크기가 증가하였다. 공주보에서는 나지 서식처의 조각 수가 보 개방 전 4개에서 보 개방 후 2018년에는 15개, 2020년에는 41개로 꾸준히 증가하였다 (Fig. 6). 2020년 세종보에서 나지의 경관형태 지수가 다소 감소한 것을 제외하면 세종보와 공주보에서 육역 서식처와 개방수면의 경관형태지수는 보 개방 후 꾸준히 증가하는 경향이였다 (Fig. 7). 특히 개방수면의 경관형태지수는 세종보에서 보 개방 전 4.5, 2018년에 8.0, 2020년에 8.9로, 공주보에서 보 개방 전 4.4, 2018년에 4.9, 2020년에 5.4로 꾸준히 증가하였다. 한편 서식처 다양도지수는 보 수문개방 전에 비하여 2018년 수문개방 후에 부용리 구간에서 6%가 감소하였고, 세종보와 공주보 구간에서 각각 24%, 21%가 증가하였다 (Fig. 7). 다만 대홍수가 있었던 2020년에는 모든 구간에서 서식처 다양도지수가 증가하였다. 이상의 결과를 보아서 보 개방에 따라서 나지 서식처의 경관구조가 보 건설 이전의 상태로 회복되는 경향이었고, 나지 서식처의 형태가 보다 불규칙하게 변화하였으며, 임지와 나지의 서식처 조각은 조각의 수와 크기가 다소 증가하였다.

4. 논의

온대 몬순 기후에 속하는 한국에서는 홍수기에 하천 유량이 급증하는 수문특성을 보인다. 이러한 홍수류는 하천에 모래 또는 자갈 사주를 발달시키는 수리적인 요인으로 작용한다 (Cho et al. 2011). 대형댐 건설 전의 부용리, 세종보 및 공주보 구간에서 모래사주가 넓게 발달하여 나지가 육역 서식처 중 가장 넓었다. 그러나 1980년에 이곳의 상류에 대형댐이 건설되면서 2002년에는 나지 서식처의 면적이 급격히 감소하였다. 이는 대형댐에 의한 홍수 조절에 의하여 댐 하류 하천에 모래톱을 발달시키는 주요 원인인 홍수기 유량이 분산되어 모래톱이 발달하는 것을 저해했기 때문인 것으로 생각된다 (Cho et al. 2011). 또한 조사구간에서는 모래사주와 같은 개방 나지에 초본식물이 유입되면서 초지로 변화하였고 이후 초지에 목본식물이 천이되면서 임지로 변화하였다 (Jin and Cho 2016). 대형댐 하류에서 축소된 모래톱은 수질을 정화하고 수중에 산소를 공급할 뿐만 아

니라, 식생이 없는 사주의 고유 특성을 요구하는 야생 생물에게 서식처를 제공하는 중요한 생태적 기능을 수행한다 (Fernald et al. 2006, Ock et al. 2020). 개방 사주의 급격한 변화와 함께 초지와 임지 서식처 조각의 수, 평균면적, 경관형태지수 및 서식처 다양도지수가 증가하는 경향이 나타나서, 이들 식생 서식처가 점차 파편화되었다. 이처럼 나지 서식처가 식생 조각으로 변하는 이유는 상류에 축조된 댐에 의하여 유량이 조절되어 식생의 활착 기회가 증가하였기 때문인 것으로 생각된다 (Woo et al. 2010). 한편, 육역 서식처 변화와 더불어 댐 건설이후에 하류 조사구간에서 개방수면의 경관형태지수가 건설 후 초기에 급격히 증가하여 하안 형태의 불규칙성이 증가하였다. 따라서 대형댐 건설 이후에 시간이 경과함에 따라서 댐 하류 하천에서 단순한 서식처 면적의 변화뿐만 아니라 경관 요소의 공간적 특성도 변하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 서식처 파편화가 생물다양성이 미치는 영향은 다양할 수 있다. 서식처 단편화가 생물종 개체군의 크기를 감소시키고, 주변의 교란으로부터 보호되는 중심지역이 감소하고, 생물의 이동을 차단하여 종다양성 감소의 원인이 될 수 있다 (Collinge 1996, Haddad et al. 2015). 그러나 서식처 파편화가 서식처의 다양성을 증가시켜 생물다양성 부양에 긍정적인 영향을 줄 수 있다는 상반된 연구 결과도 있다 (Fahrig et al. 2019). 이러한 측면에서 대형댐 건설 후 단순한 나지 서식처에서 다양한 식생이 어우러진 복잡한 서식처 환경으로 변화하면서 나지 서식처를 선호하는 종 외에 초지나 임지를 선호하는 생물종의 다양성이 증가할 수 있다. 그러나 하안의 모래사주는 하천 생태계의 고유한 서식처이기 때문에 모래사주의 파편화와 수립화는 개방 사주의 특이적인 생물종의 다양성을 위협할 수 있다.

금강에서 4대강 보 건설 이후 대조구간인 부용리 구간에서는 식생 천이과정에 의해 나지가 줄고, 초지가 전반적으로 증가하였으며, 목본 식생이 조사구간 상류에서 산발적으로 증가하였다. 이러한 면적 변화와 더불어 부용리 구간에서 나지, 초지 및 임지의 경관형태지수가 모두 증가하였다. 보 축조의 영향을 직접 받는 세종보와 공주보 구간에서는 보 축조와 저수로 준설의 영향으로 개방수면이 증가하였고, 하중도와 저수로 변에 위치한 개방사주인 나지 서식처가 사라져 저수로 하안의 형태가 극히 단순하게 변화하였다. 대조구간인 부용리

구간과 비교하면 개방수면의 경관형태지수의 감소가 현저하였다. 하천에서 하안의 형태가 복잡해지면 어류와 같은 수생생물의 서식처 환경 조건이 다양해지고 이들 생물에게 먹이를 공급하고 오염물질을 여과하는 접하는 하안공간의 넓어져서, 하안 형태의 복잡도는 어류의 생물다양성과 양의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있다 (Kim et al. 2012). 따라서 보 건설 후에 세종보와 공주보에서 단순해진 하안의 형태와 감소한 서식처 다양도지수는 생태적 기능이 저하될 수 있는 것으로 생각된다. 그러나 4대강사업으로 고수부에서 농지를 초지로 복원한 것은 하안 생태계의 생태적 기능을 강화하는데 도움이 되었을 것으로 생각된다.

2017년부터 실시된 보의 수문 개방으로 세종보와 공주보 구간에서는 보 건설 후 사라졌던 나지가 나타났고, 육역 서식처와 개방 수면의 경관형태지수가 증가하고 서식처 다양도지수가 증가하여 서식처의 경관 특성이 보 건설 이전으로 점차 회복되는 것으로 나타났다. 대조구간인 부용리 구간에서는 2018년에 식생 천이에 의해 나지 서식처가 줄어들면서 서식처 다양도지수가 감소하였다가 2020년에 발생한 대홍수의 영향으로 서식처 다양도지수가 회복되었다.

보 수문개방 전 후 세종보와 공주보의 서식처 면적 변화를 보의 상하류로 나누어 살펴보면, 보 하류보다 보 상류에서 보 개방의 효과가 더 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 보 하류에서 서식처 환경 변화가 지연되는 이유는, 해당 보의 하류에 위치한 보와 수문적 특성이 연동되어 있고, 보 상류로부터 유사가 하류로 이동하면서 지형이 천천히 변하기 때문인 것으로 생각된다. 세종보 하류의 경우에는 보 개방 후 2018년부터 2020년에 이르기까지 나지 서식처가 꾸준히 증가하였다. 그러나 공주보 하류에서는 보 개방 직후인 2018년에 나지의 면적이 거의 변화하지 않다가 2020년에 크게 증가하였다. 이러한 이유는 2018년에 하류에 위치한 백제보가 수문개방을 하지 않고 관리수위로 높게 수위를 유지하였기 때문인 것으로 생각된다. 특히 본 연구의 조사구간에 속하지 않는 백제보에서는 2020년에 보를 개방한 후에 보 하류에서 서식처 환경이 크게 변하지 않았는데 이는 이곳의 하류에 위치한 금강 하구둑에 의해 보 개방이후에 수위의 변화가 크지 않기 때문이다.

4대강 보의 건설과 수문 개방의 결과를 종합하면 보를 건설하면서 나지가 사라지고, 하안선이 단순해진 세

중보 및 공주보 구간에서 보 개방의 효과로 종적연결성이 회복되면서 다시 보 건설 전의 형태로 회복되어 가는 것을 확인하였다. 다만, 보 하류에서는 하류 보와 수위가 연동되기 때문에 완전한 보 개방의 효과를 보기 위해서는 해당 보의 수문뿐만 아니라 하류에 위치한 보의 수문개방도 연동하여 운영되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 대청댐과 4대강 보와 같은 횡단구조물의 건설 및 운영이 생물 서식처에 미치는 영향을 알아보기 위하여 부용리, 세종보, 공주보의 3개 구간을 선정하여 서식처의 분포 변화와 경관적 공간특성을 분석하였다. 서식처는 수역, 나지, 초지, 임지, 농지, 인공지로 분류하였다. 금강의 조사구간에서는 대청댐 건설 이후에 나지 서식처의 감소와 식생 서식처의 증가, 서식처 파편화 및 서식처 다양도지수 증가 현상이 나타났다. 4대강살리기 사업의 일환으로 보가 건설된 이후에는 세종보, 공주보 구간에서 하중도나 고수부 근처의 사주나지 서식처가 소실되었고, 하안의 형태가 매우 단순하게 변하였다. 이와 동시에 서식처 다양도지수가 감소하였다. 그러나 보 개방 후에는 보 건설 후 사라졌던 나지가 다시 생겨나고, 단순해진 하안의 형태가 보 건설 전의 형태로 회복되는 것을 확인하였다. 다만, 보 상류구간에서는 보 개방의 효과가 즉각적으로 나타났지만, 보 하류에서는 유사 이동의 지연과 하류에 위치한 보의 수문 개방에 영향을 받아서 서식처 변화가 느리게 나타났다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업 (2020003050002)의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- Cho, H., Oh, K.S., and Yang, J.H. 2011. Geomorphological significance and role of the sand bars of major river valleys in the South Korea -case study on the Nakdong river valleys-. *Journal of the Korean Geomorphological Association* 18: 1-14.
- CNI. 2017. Report of water environment monitoring after Geum river restoration project. ChungNam Institute,

- Gongju, Republic of Korea. (in Korean)
- Collinge, S. 1996. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning* 36: 59-77.
- Dosskey, M.G., Vidon, P., Gurwick, N.P., Allan, C.J., Duval, T.P., and Lowrance, R. 2010. The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams. *Journal of the American Water Resources Association* 46: 261-277.
- Fahrig, L., Arroyo-Rodriguez, V., Bennett, J.R., Boucher-Lalonde, V., Cazetta, E., Currie, D.J., Eigenbrod, F., Ford, A.T., Harrison, S.P., Jaeger, J.A.G., Koper, N., Martin, A.E., Martin, J.-L., Metzger, J.P., Morrison, P., Rhodes, J.R., Saunderson, D.A., Simberloff, D., Smith, A.C., Tischendorf, L., Vellend, M., and Watling, J.I. 2019. Is habitat fragmentation bad for biodiversity? *Biological Conservation* 230: 179-186.
- Fernald, A.G., Landers, D.H., and Wigington Jr, P.J. 2006. Water quality changes in hyporheic flow paths between a large gravel bed river and off-channel alcoves in Oregon, USA. *River Research and Applications* 22: 1111-1124.
- Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D., Lovejoy, T.E., Sexton, J.O., Austin, M.P., Collins, C.D., Cook, W.M., Damschen, E.I., Ewers, R.M., Foster, B.L., Jenkins, C.N., King, A.J., Laurance, W.F., Levey, D.J., Margules, C.R., Melbourne, B.A., Nicholls, A.O., Orrock, J.L., Song D.-X., and Townshend, J.R. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* 1: e1500052.
- Im, R.Y., Kim, J.Y., Choi, J.Y., Do, Y., and Joo, G.J. 2015. Changes of river morphology in the mid-lower part of Nakdong River basin after the 4 Large River Project, South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 48: 188-194. (in Korean)
- Im, R.Y., Kim, J.Y., Nishihiro, J., and Joo, G.J. 2020. Large weir construction causes the loss of seasonal habitat in riparian wetlands: a case study of the Four Large River Projects in South Korea. *Ecological Engineering* 152: 105839.
- Jang, C.R. and Shimizu, Y. 2010. Numerical simulation of sand bars downstream of Andong Dam. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 30: 379-388. (in Korean)
- Jansson, R., Nilsson, C., and Renöfält, B. 2000. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams. *Ecology* 81: 899-903.
- Jeon, D.J., Kim, J.Y., Kim, T.H., and Eun, J. 2013. A study on environment monitoring of 4 major rivers project. Korea Environment Institute, Seoul, Republic of Korea. (in Korean)
- Jeong, A.C., Kim, S.W., Yu, W.S., Kim, Y.K., and Jung, K.S. 2018. Estimation of river dredging location and volume considering flood risk variation due to riverbed change. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 18: 279-291. (in Korean)
- Jin, S.N. and Cho, K.H. 2016. Expansion of riparian vegetation due to change of flood regime in the Cheongmi-cheon Stream, Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 322-326. (in Korean)
- Kim, J.A., Lee, S.W., Hwang, G.S., and Kim, C.G. 2012. Relationship between fish assemblages community and streamline complexity. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 15: 19-29. (in Korean)
- Kim, Y.J., Lee, S.J., and An, K.G. 2019. Characteristics of chemical water quality and the empirical model analysis before and after the construction of Baekje Weir. *Korean Journal of Environmental Biology* 37: 48-59. (in Korean)
- Kwak, J.W., Jin, H.S., and Kim, H.S. 2017. An assessment of flow characteristic and riverbed change by construction of hydraulic structure. *Journal of Wetlands Research* 19: 542-550. (in Korean)
- Lee, H.J., Park, H.K., and Cheon, S.U. 2018. Effects of weir construction on phytoplankton assemblages and water quality in a large river system. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15: 2348.
- McGarigal, K., Cushman, S.A., and Ene, E. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>. Accessed 3 January 2021.
- MLIT. 1997. Korea annual hydrological report. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Gwacheon, Republic of Korea. (in Korean)
- MLTMA. 2011. Basic plan for the Guem river development and management. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Gwacheon, Republic of Korea. (in Korean)
- MOCT. 2006. Geumgang river basin investigation report 3: Hydrologic investigation report. Ministry of Land, Construction and Transportation, Gwacheon, Republic of Korea. (in Korean)
- MOE. 2020. Comprehensive report on monitoring of weir gate control of the four major rivers. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea. (in Korean)
- MOE. 2021. Water environment information system. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea. <http://water.nier.go.kr/>. Accessed 31 January 2021. (in Korean)
- Naiman, R.J., Decamps, H., and Pollock, M. 1993. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity.

- Ecological Applications 3: 209-212.
- NGII. 2020. National spatial data infrastructure platform. National Geographic Information Institute, Suwon, Republic of Korea. <http://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do>. Accessed 11 November 2020.
- Ock, G.Y., Choi, M.Y., Kim, J.C., Park, H.G., and Han, J.H. 2020. Evaluation of habitat diversity changes by weir operation of the Sejongbo weir in Geum river using high-resolution aerial photographs. *Ecology and Resilient Infrastructure* 7: 366-373. (in Korean)
- ODM (OpenDroneMap). 2020. A Command Line Toolkit to Generate Maps, Point Clouds, 3D Models and DEMs from Drone, Balloon or Kite Images. <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>. Accessed 11 November 2020
- Pinay, G. and Decamps, H. 1988. The role of riparian woods in regulating nitrogen fluxes between the alluvial aquifer and surface water: a conceptual model. *Regulated Rivers: Research & Management* 2: 507-516.
- Turner, M.G. 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20: 171-197.
- Woo, H.S., Park, M.H., Cho, K.H., Cho, H.J., and Chung, S.J. 2010. Recruitment and succession of riparian vegetation in alluvial river regulated by upstream dams-focused on the Nakdong River downstream Andong and Imha Dams. *Journal of Korea Water Resources Association* 43: 455-469. (in Korean)