하천에서 보 형태에 따른 어류군집 구조 및 생태유량 평가 Assessment of Ecological Flowrate and Fish Community to Weir Type in Stream

허준욱[†] · 장창래* · 김규호**

Jun Wook Hur[†] · Chang Lae Jang* · Kyu Ho Kim**

생물모니터링센터 · *한국교통대학교 토목공학과 · **한국건설기술연구원

Bio-Monitoring Center · *Department of Civil Engineering, Korea national university of transportation

**Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received March 7, 2017; Revised March 30, 2017; Accepted May 18, 2017)

Abstract : The objectives of this study were to analyze ecological characteristics of fish compositions and estimate the optimal ecological flow using the physical habitat simulation system (PHABSIM) in Wonju stream and Boseong river. We sampled fishes using two gears such as casting net and kicknet to determine fish distribution and also measured flow velocity, water depth, bed material at the point where fish collected. Total number of species and individuals sampled were 20 and 2,104, respectively and dominant species was *Zacco platypus* (39.7%) and subdominant species was *Z. koreanus* (RA: 15.8%) in Wonju stream. In Boseong river, collected fishes were 1,638 individuals, 28 species. Dominant and sub-dominant species was *Z. platypus* (RA: 22.0%) and *Microphysogobio yaluensis* (RA: 17.2%), respectively. For calculating habitat suitability index (HSI), we selected *Z. platypus* as representative fish species and analyzed water depth and flow velocity. Water depth and flow velocity were 0.2-0.6 m, 0.1-0.3 m/s, respectively in Wonju stream and 0.3-0.6 m, 0-0.3 m/s, respectively in Boseong river. According to the analysis of ecological flow simulation, optimal flow was 1.1 cms and 0.3 cms in Wonju stream and 0.4cms, 2.2cms in Boseong river at up and down stream respectively. WUA (Weighted Usable Area) was 9.5%, 26.6% in Wonju stream and 34.8%, 53.3% in Boseong river at up and down stream respectively.

Key Words : Fish, Ecological Flow, Weir Type, Habitat Suitability Index (HSI), Physical Habitat Simulation System (PHABSIM)

요약 : 본 연구는 원주천과 보성강에서 보의 형태에 따른 어류 군집 구조를 파악하고, 보를 중심으로 상하류에 PHABSIM을 이용한 최적 생태유량을 산정하여 물리적 서식지 평가를 실시하였다. 2014년 8월부터 2015년 9월까지 원주천의 콘크리트 보(반곡보) 6회, 보성강의 돌보는 5회 조사를 실시하였다. 어류는 투망과 족대를 이용하여 채집하였으며, 어류를 채집한 지점에서 유속, 수심, 하상재료를 측정 및 관찰하였다. 어류상을 토대로, 생물다양도(우점도, 균등도, 다양도, 풍부도)를 측정하였으며, PRIMER5를 통해 군집유사도를 산출하였고, PHABSIM을 이용하여 최적 유량을 산정하였다. 원주천에서는 7과 20종 2,104개체가 채집되었으며 피라미와 참갈겨니가 각각 39.7%, 15.8%로 우점 및 아우점하였다. 보성강에서는 6과 28종 1,638개체가 출현하였고, 피라미와 돌마자가 각각 22.0%, 17.2%로 우점 및 아우점하였다. 서식지적합도지수(Habitat Suitability Index, HSI)를 산정하기 위해 두 지점의 대표어종인 피라미를 선정하였다. 그 결과 원주천에서는 수심 0.2~0.6 m 유속 0.1~0.3 m/s로 측정되었고, 보성강에서는 수심 0.3~0.6 m, 유속 0~0.3 m/s로 나타났다. PHABSIM을 이용한 최적 생태유량 모의 결과 원주천의 보 상류가 1.1 cms, 하류가 0.3 cms, 보성강은 상류가 0.4 cms, 하류가 2.2 cms로 나타나 각각의 하천에서 반대의 결과가 나타났다. 최적유량 적용시 가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA)은 원주천이 상류 9.5%, 하류 26.6%, 보성강은 상류 34.8%, 하류 53.3%로 나타났다.

주제어 : 어류, 생태유량, 보형태, 서식지적합도지수, 물리적 서식지 모의 시스템

1. 서론

하천에 건설된 수리구조물(hydraulic structure)은 장마 및 홍수 등의 수해를 막고, 물을 인간 생활에 유용하게 이용하기 위한 목적으로 만들어졌다. 이러한 인공구조물은 하천 생태계에 물리 및 화학적으로 다양한 변화를 초래하여 생물 다양성을 감소시키고, 생태계의 종적 연결성을 차단하는 대표적인 요인으로 작용하고 있다. 하천에서 종적 연결성의 의미는 단순히 상류에서 하류로 물질이 이동하는 것뿐만 아니라, 많은 생물에게 연속된 서식지와 이동통로를 제공하므로 큰 의미를 갖는다. 보와 댐의 건설 등에 의하여 종적 연결성이 상실되면 생물 이동에 장애가 되어 국지적

으로 생물종이 절멸하는 경우가 생길 수 있다.¹⁾

우리나라의 하천은 급속한 산업화와 도시화로 인해 이수기능의 극대화를 가져왔으며, 동시에 토지이용의 고밀화로 하천의 치수기능이 확대되었다. 하천의 구조물 설치에 따른 수리 및 지형학적 특성을 변화시켜, 장기 및 단기적인 하천의 변화를 가져와 물리적 교란을 발생시킨다.²⁾ 하천에 서식하는 어류는 수환경의 물리, 화학 및 생물학적 특성에 따라 직접 및 간접적으로 많은 영향을 받는다.³⁾ 이중 하천의 수심(water depth), 유속(velocity), 하상재료(substrate size), 여울(riffle) 및 소(pool) 배열 등은 하천의 물리적 특성으로 어류 군집(fish community) 및 생활사(life cycle)에 중요한 요인으로 작용한다.^{4,5)}

지금까지 하천에 서식하는 어류의 서식지 평가는 어류상

[†] Corresponding author E-mail: junwhur@hanmail.net Tel: 044-868-6846 Fax: 044-868-6856

및 군집구조를 중심으로 이루어졌다. 하천 수리구조물과 어류생태에 관한 연구로는 보에 설치된 어도와 어류의 이동성에 대하여 주로 연구되고 있으며, 수리구조물과 어류 서식지 및 군집특성에 관한 연구는 오 등,⁶⁾ 조 등,⁷⁾ 최 등,⁸⁾ 한 등⁹⁾에 의해 4대강을 중심으로 수행되었다. 어류를 이용한 생태유량 평가와 관련된 연구로 김 등¹⁰⁾은 하천 유량에 따른 어류의 성장 단계별 생태학적 서식지 선호도를 모의하였고, 개별 어종에 대한 최적유량을 산정하였으며, Moir 등¹¹⁾은 하천의 흐름을 9개의 구간별로 나누어 서식지적합도지수(habitat suitability index, HSI)와 PHABSIM을 이용한 어류 생태유량을 분석하였다. 정 등¹²⁾은 PHABSIM과 River 2D를 이용하여 대상 어종의 성장 단계별 가중가용면적(weighted usable area, WUA)을 비교하고, 어류 서식조건을 고려한 최적유량을 산정하였다. 허와 김⁴⁾은 어류 모니터링을 통해 작성된 서식지적합도지수를 기반으로 PHABSIM을 이용한 최적 생태유량을 산정하였다. 최와 이²⁾의 연구에서는 원주천을 대상으로 목표어종을 선정하고 하천구조 개선에 따른 어류 서식적합도와 물리적 교란의 상관성을 분석하였다.

본 조사연구에서는 하천 구조물인 보의 형태에 따른 어류 군집구조와 상류 및 하류 간에 생태유량의 변화를 알아보고자, 원주천에 콘크리트 보와 보성강의 돌보를 중심으로 어류 조사 및 물리적 서식지 평가를 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사 지점

본 조사는 2014년 8월부터 2015년 9월까지 원주천(St.1~4) 및 보성강(St.5~8)에서 계절에 따라 원주천 6회 및 보성강 5회 조사를 실시하였다. 원주천은 콘크리트 보로 시설된 하천이며, 보성강은 돌보로 만들어진 하천이었다(Fig. 1~4).

Fig. 1. Location map of the study station of Wonju stream.

Fig. 2. Location map of the study station of Boseong river.

Fig. 3. Study station of Wonju stream.

Fig. 4. Study station of Boseong river.

보를 중심으로 상류 및 하류에 각각 2개 정점을 선정하였으며, 각 조사 정점의 행정구역명, 위도 및 경도는 다음과 같다.

원주천(콘크리트 보)

- St.1 : 강원도 원주시 관설동 대평교(N 37° 18'41", E 127° 58'38")
St.2 : 강원도 원주시 단구동 반곡보 상류(N 37° 20'28", E 127° 57'48")
St.3 : 강원도 원주시 단구동 반곡보 하류(N 37° 20'34", E 127° 57'44")
St.4 : 강원도 원주시 태장동(N 37° 21'33", E 127° 57'05")

보성강(돌 보)

- St.5 : 전라남도 보성군 검백면 평호리 평화교(N 34° 50'32", E 127° 09'03")
St.6 : 전라남도 보성군 검백면 석호리 돌보 상류(N 34° 50'50", E 127° 09'14")
St.7 : 전라남도 보성군 검백면 석호리 돌보 하류(N 34° 50'53", E 127° 09'13")
St.8 : 전라남도 보성군 검백면 은덕리(N 34° 51'03", E 127° 08'28")

2.2. 조사방법

어류조사는 상류 및 하류 각각 200 m 구간에서 60분씩 실시하였으며, 소(pool), 여울(riffle) 및 흐름이 있는 곳(run)을 모두 포함하여 조사하였다. 조사지점 하천의 특성에 따라 어류의 채집은 투망(7×7 mm) 및 족대(4×4 mm)를 이용하였으며, 채집된 어류의 물리적 특성을 측정하였다. 투망으로 채집은 정량적 조사를 수행하기 위하여 지점별로 20회 내외로 동일하게 실시하였으며, 족대는 하천 수변부의 수초와 호박돌 주변에서 채집하였다. 투망 및 족대 채집 지점에서 포획 후에 유속계를 사용하여 수심 및 유속을 기록하였으며, 하상재료는 육안으로 확인하였다. 채집된 어류는 현장에서 종을 동정하여 개체수 기록 및 사진촬영 후 방류하였다. 어종의 동정은 13)~18)의 문헌을 참고하였으며, 분류체계¹⁹⁾의 방법으로 정리하였다. 또한 각 지점에서 하천 특성과 수심, 유속 및 유량 등의 단면정보를 2회 이상 조사하여 생태유량 산정에 이용하였다.

2.3. 생물다양도

어류상(fish fauna) 및 우점도 분석을 위해서 채집어류의 출현 개체수에 따라 상대풍부도를 분석하였으며, 이를 근거로 하여 우점종(dominant species) 및 아우점종(subdominant species)을 확인하였다. 군집분석(community analysis)은 어종(fish species)의 개체수를 기준으로 우점도(dominance index, DI), 종다양도(diversity index, H), 균등도(evenness, E) 및 종풍부도(richness, R)를 산출하였다. 산출 방법과 식은 다음과 같다.

우점도는 환경의 변화가 악화될수록 특정종의 우세를 나

타낸다. 각 조사 지점의 어종별 개체 출현에 대하여 대상어종의 우점도를 산출하였다(식 (1)).²⁰⁾

$$D = n_i/N \quad (1)$$

D: 우점도, N: 총 개체 수, n_i : 제 I번째 종의 개체수

종다양도는 군집분석시 가장 많이 쓰이고 있으며, 풍부성을 지닌 종뿐만 아니라 보다 희귀성을 지닌 종까지 가치를 부여하는 방법으로 21)의 정보 이론에 의하여 유도된 Shannon-Weaver function¹⁸⁾을 사용하여 도출하였다(식 (2)).

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (P_i = n_i/N) \quad (2)$$

균등도는 각 지수의 최대치에 대한 실제치의 비로서 표현되며, 각 다양도 지수는 군집 내 모든 종의 개체수가 동일할 때가 최대가 되므로 결국 균등도 지수는 군집 내 종구성의 정도를 나타내는 것으로 22)의 식 (3)을 사용하였다.

$$E = H'/\ln(S) \quad (3)$$

E: 균등도, H': 다양도, S: 전체 종 수

종풍부도는 군집 내에 존재하는 종의 수에 근거한 종의 밀도이다. 단위 지점별 종의 출현을 나타내며 이때 고려할 것은 전체종의 수(S)이다. 본 조사 시 각 조사 지점별 총 개체수와 총 종수의 값으로 기초로 하여 21)의 지수를 산출하였으며, 식 (4)는 아래와 같다.

$$R = (S-1)\ln(N) \quad (4)$$

R: 풍부도, S: 전체 종 수, N: 총 개체 수

2.4. 군집유사도

각 지점에서 채집된 어류의 군집간 유사도를 알아보기 위하여 각 종과 개체수 결과를 활용 및 프로그램(PRIMER 5)을 통하여 결과를 산출하였다(식 (5)).

$$2C/(A+B) \quad (5)$$

A: 표본 A에 포함되는 종수, B: 표본 B에 포함되는 종수,
C: 표본 A와 B의 공통 종수

2.5. 생태유량 산정

물리적 서식지 모의 시스템(physical habitat simulation system, PHABSIM)을 이용하여 흐름특성(유량-유속, 수심 등)의 변화에 대한 하도구간내 대상어종의 물리적 서식지 변화를 예측하여 대상어종에 대한 유량-가용서식지면적(weighted usable area, WUA) 관계를 통해 서식에 필요한 최적 유량을 산정하였다.²³⁾ 어류를 중심으로 하는 생태유량의 산정은 수위, 유량 및 하천단면 등의 현장 조사 결과와 본 조사에서 작성한 서식지적합도지수(Habitat suitability index,

HSI) 및 PHABSIM에 적용하여 어종별 WUA-유량관계 곡선을 작성하였다.

HSI는 특정 조사지점이나 구간에서 출현한 대표어종의 개체수를 기준으로 작성된다. 수심 및 유속 구간별로 조사기간 동안 출현한 개체수와 단면정보(기대값)를 조합한 최대값을 1.0으로 하고, 나머지는 최대값에 대한 상대비율로 설정하였다. HSI의 작성은 수심과 유속에 대하여 단일변량곡선(univariate curve) 방법을 사용하였으며, HSI와 생태유량 산정을 위한 자료는 4)의 방법으로 정리하였다. 본 조사에서는 원주천과 보성강의 보를 중심으로 상류 및 하류에 각각 1개의 정점에서 생태유량을 산정하였다. 대표어종은 원주천과 보

성강의 우점종인 피라미(*Zacco platypus*)로 선정하였는데, 두 하천에서 공통적으로 서식하며 서식지적합도지수의 신뢰성을 높이기 위해 개체수가 풍부한 어종을 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 어류상

원주천에서 채집된 어류는 총 7과 20종 2,104개체였다(Table 1). 과(family)로는 잉어과(Cyprinidae) 어류가 10종으로 전체 채집된 어종의 50.0%로 가장 많이 출현하였고, 미꾸리과

Table 1. The list and individual number of collected fishes at each station

Species	Wonju stream							Boseong river						
	St.1	St.2	St.3	St.4	Number	RA (%)		St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	Number	RA (%)	
Cyprinidae														
<i>Carassius auratus</i>				59	59	2.80		1		4	1	6	0.37	
<i>°Rhodeus uyekii</i>								1				1	0.06	
<i>Rhodeus notatus</i>										1		1	0.06	
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>											5	5	0.31	
<i>°Acheilognathus koreensis</i>								37	39	13	41	130	7.94	
<i>°Acheilognathus yamatsutae</i>								16	27	1	27	71	4.33	
<i>Acheilognathus rhombeus</i>								5	5	2	15	27	1.65	
<i>°Acanthorhodeus gracilis</i>								10		1	4	15	0.92	
<i>°Coreoleuciscus splendidus</i>	3	46	66	8	123	5.85								
<i>Pungtungia herzi</i>	44	30	40	26	140	6.65		19	55	44	58	176	10.74	
<i>°S. variegatus wakiyae</i>								10	74	38	12	134	8.18	
<i>°Squalidus gracilis majimae</i>	33	29	13	7	82	3.90								
<i>°S. chankaensis tsuchigae</i>								56		9	39	104	6.35	
<i>Hemibarbus labeo</i>								7		4	4	15	0.92	
<i>Hemibarbus longirostris</i>		1	1	37	39	1.85		2	5	1	2	10	0.61	
<i>Pseudogobio esocinus</i>	24	24	1	62	111	5.28		17	16	16	18	67	4.09	
<i>Abbottina rivularis</i>								4				4	0.24	
<i>°Microphysogobio yaluensis</i>	41	46	14	20	121	5.75		164	19	29	69	281	17.16	
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	86	3	14	2	105	4.99								
<i>°Zacco koreanus</i>	137	101	73	8	319	15.16		1			30	31	1.89	
<i>Zacco platypus</i>	243	101	229	262	835	39.69		154	44	81	81	360	21.98	
<i>O. uncistrostris amurensis</i>								18		12		30	1.83	
<i>°Hemiculter eigenmanni</i>								6	16		22	44	2.69	
balitoridae														
<i>Orthrias nudus</i>	30	6	9	5	50	2.38								
Cobitidae														
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>		1	2	13	16	0.76		2			1	3	0.18	
<i>Misgurnus mizolepis</i>				4	4	0.19								
<i>°Koreocobitis rotundicaudata</i>	1	5		1	7	0.33								
<i>°Iksookimia koreensis</i>	29	2	9	4	44	2.09								
<i>Cobitis lutheri</i>								4	1	4	5	14	0.85	
Amblycipitidae											1	1	0.06	
<i>°Liobagrus mediadiposalis</i>														
Adrianichthyidae				7	7	0.33								
<i>Oryzias sinensis</i>														
Centropomidae								2		1		3	0.18	
<i>siniperca scherzeri</i>														
<i>°Coreoperca herzi</i>			7	2	9	0.43		14	9	2	19	44	2.69	
Odontobutidae														
<i>°Odontobutis platycephala</i>	1	1		8	10	0.48		7	7	7	12	33	2.01	
<i>°Odontobutis interrupta</i>	5	6	1	7	19	0.90		3			3	6	0.37	
gobiidae														
<i>Rhinogobius brunneus</i>			4		4	0.19		15	2	3	2	22	1.34	
Number of family	4	4	6	6	7			5	5	5	6	7		
Number of species	13	15	15	19	20			25	14	20	23	28		
Number of individual	677	402	483	542	2,104			575	319	273	471	1,638		

° : Korean endemic species, RA : relative abundance

(Cobitidae)가 4종으로 20%를 차지하였다. 이와 같이 잉어과와 미꾸리과에 속하는 어종이 풍부하게 출현하는 것은 한국의 서해와 남해로 유입되는 하천에서 볼 수 있는 담수어류상의 공통된 특징으로 알려져 있다. 한국고유종(Korean endemic species)은 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*), 긴물개(*Squalidus gracilis majimae*), 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*) 및 참갈겨니(*Zacco koreanus*) 등 9종(45.0%)이었으며, 그밖에 환경부 지정 보호종 및 외래종의 서식은 확인되지 않았다. 개체수 구성비가 가장 높은 종은 피라미로 39.7%였으며, 다음은 참갈겨니(15.2%), 돌고기(*Pungtungia herzi*, 6.7%), 쉬리

(5.8%) 및 돌마자(5.8%)였다(Fig. 5). 원주천의 조사지역 중간에 위치한 반곡보를 기준으로 상류(St. 1 및 St. 2) 및 하류(St. 3 및 St. 4)로 구분하였을 때, 출현한 어류는 상류가 4과 15종 1,079개체, 하류는 7과 20종 1,025개체였다. 상류 및 하류 각각 우점종은 피라미, 아우점종은 참갈겨니였다.

보성강에서는 총 6과 28종 1,638개체가 출현하였다(Table 1). 과별 출현 종수는 잉어과 어류가 20종으로 전체의 71.4%를 차지하였고, 미꾸리과, 꺾지과(Centropomidae) 및 동사리과(Odontobutidae)가 각각 2종씩 출현하였다. 한국고유종은 각시붕어(*Rhodeus uyekii*), 참중고기(*Sarcocheilichthys varie-*

Fig. 5. Relative abundance of collected fish in up and down stream of Wonju stream.

Fig. 6. Relative abundance of collected fish in up and downstream of Boseong river.

gatus wakiyae), 꺾지(*Coreoperca herzi*) 등 13종(46.4%)이었으며, 환경부 지정 보호종 및 외래종은 출현하지 않았다. 전체 우점종은 피라미로 상대풍부도 22.0%를 차지하였고 그 외 돌마자(17.2%), 돌고기(10.7%), 참중고기(8.2%) 순으로 나타났다(Fig. 6). 보성강 조사지역 중간에 위치한 돌보를 기준으로 상류(St. 5 및 St. 6) 및 하류(St. 7 및 St. 8)로 구분하였을 때, 출현한 어류는 상류가 5과 25종 894개체, 하류는 6과 26종 744개체였다. 우점종은 피라미로 동일하였고, 아우점종은 상류가 돌마자, 하류는 돌고기였으며, 기타 우세종으로 상류는 참중고기(9.4%) 및 돌고기(8.3%), 하류는 돌마자(13.2%) 및 갈납자루(*Acheilognathus koreensis*) (7.3%)로 확인되었다.

3.2. 생물다양도

원주천 조사지점의 생물다양도 분석 결과는 Table 2와 같다. 우점도 지수는 평균 0.39 ± 0.11 로 군집안정도에서 양호 및 안정 상태로 나타났으며, 반곡보 상류는 0.31 ± 0.08 및 하류는 0.48 ± 0.01 로 차이를 보였다. 종다양도 지수는 전체 평균 1.90 ± 0.12 로 반곡보 상류는 1.97 ± 0.08 및 하류는 1.82 ± 0.12 로 나타났다. 출현어종의 다양성을 나타내는 다양도 지수와 한 종이 우점을 나타내는 우점도 지수는 서로 상반관계의 개념으로 본 연구에서 나타난 결과로는 반곡보 하류 구간이 상류에 비하여 불량한 것으로 사료된다. 균등도 지수는 상류 0.75 ± 0.01 및 하류 0.64 ± 0.01 로 상류에서 어종이 고르게 분포하는 것으로 나타났으며, 종풍부도 지수는 상류 및 하류가 각각 2.09 ± 0.35 및 2.56 ± 0.42 로 많은 어종이 출현한 하류에서 높은 값을 보였다.

보성강의 경우 우점도는 평균 0.25 ± 0.06 , 종다양도 2.32 ± 0.18 , 균등도 0.78 ± 0.07 및 종풍부도 3.25 ± 0.68 로 어류군집

Table 2. Bio-diversity analysis of collected fish at up and down streams

Watershed	Group	Biodiversity index			
		Dominance	Diversity	Evenness	Richness
Wonju stream	Up stream	0.31 ± 0.08	1.97 ± 0.08	0.75 ± 0.01	2.09 ± 0.35
	Down stream	0.48 ± 0.01	1.82 ± 0.12	0.64 ± 0.01	2.56 ± 0.42
Boseong river	Up stream	0.26 ± 0.04	2.23 ± 0.03	0.77 ± 0.10	3.02 ± 1.08
	Down stream	0.23 ± 0.09	2.41 ± 0.25	0.79 ± 0.06	3.48 ± 0.13

이 안정된 상태로 나타났다(Table 2). 돌보를 기준으로 상류 및 하류 구간을 비교해보았을 때, 우점도는 0.26 ± 0.04 및 0.23 ± 0.09 , 종다양도는 2.23 ± 0.03 및 2.41 ± 0.25 , 균등도 0.77 ± 0.10 및 0.79 ± 0.06 , 종풍부도는 3.02 ± 1.08 및 3.48 ± 0.13 으로 상류 및 하류의 결과에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 하류 구간의 어류군집이 더 양호한 것으로 나타났다.

일반적으로 상류로부터 하류로 내려갈수록 출현하는 어종 수가 증가하는 것으로 알려져 있으며, 보성강의 경우 상류에서 우점도 지수가 높고 하류는 종다양도, 균등도 및 종풍부도 지수가 높게 나타나 유사한 경향으로 나타났다. 반면 원주천은 보 상류에서 우점도 지수가 낮았고, 하류는 종다양도 및 균등도 지수가 낮게 나타나 보성강과 상반된 결과를 보였다.

3.3. 군집유사도

원주천과 보성강의 조사 지점간 어류 집괴분석을 실시한 결과는 Fig. 7과 같다. 원주천은 상관계수값 62에서 2개의 그룹으로 구분되었다. 원주천의 최하류 지점인 St. 4가 Group

Fig. 7. Dendrogram for the cluster analysis of fish collected at each station ((a) Wonju stream, (b) Boseong river).

A이고, 나머지 지점들은 Group B로 나누어졌다. Group B는 세부적으로 상관계수값 75에서 St. 3과 나머지 지점으로 나누어졌으며, St. 1 및 St. 2는 상관계수값 77로 지점간의 어류군집이 가장 유사한 것으로 나타났다.

보성강의 경우 상관계수값 69에서 2개의 그룹으로 구분되었다. Group A는 최상류 지점인 St. 5와 최하류 지점인 St. 8이 상관계수값 77로 출현한 어류의 군집이 가장 유사하였고, Group B는 돌보 상류 지점인 St. 6과 하류 지점인 St. 7로 상관계수값 70으로 나타났다.

원주천의 경우 조사지역 중간에 위치한 콘크리트보를 기준으로 상류역(St. 1 및 St. 2)과 하류역(St. 3 및 St. 4)으로 구분되어졌다. 특히 붕어(*Carassius auratus*), 돌마자, 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*) 및 참갈겨니 등의 어종은 상류역과 하류역의 상대풍부도 차이가 확연하여 보의 영향이 있는 것으로 판단된다. 반면 보성강은 지점들간의 군집 유사성이 상류 및 하류로 구분되지 않아 돌보로 인한 영향은 없는 것으로 나타났다.

3.4. 서식지적합도지수(HSI) 산정

원주천 및 보성강에서 서식지적합도지수 산정을 위한 대표어종으로 피라미를 선정하였다. 피라미는 각 수계의 어류 조사에서 우점종으로 확인되었으며, 상류부터 하류까지 풍부하게 출현한 우세종이다. 또한 개체수가 많은 어종에 대한 서식지적합도 분석 결과는 신뢰성을 높일 수 있기 때문에 대표어종으로 적합하다고 판단되었다.²⁴⁾ 하천 단면 측정은 각 수계에서 보의 직상류 및 직하류 지점에서 실시하였으며, 서식지적합도지수 또한 상류 및 하류로 구분하여 산정하였다(Table 3).

원주천의 피라미에 대한 서식지적합도지수는 수심이 상류 0.4~0.6 m 및 하류 0.2~0.4 m로 차이를 보였으며, 유속은 0.1~0.3 m/s로 동일하게 나타났다. 보성강 조사지점의 피라미에 대한 서식지적합도지수는 수심이 상류 0.4~0.6 m 및 하류 0.3~0.5 m였고, 유속은 상류가 0~0.2 m/s 및 하류는 0.1~0.3 m/s로 산정되었다.

원주천에서 어류를 이용한 서식지적합도지수는 하천구조 개선에 따른 어류 서식적합도 분석 연구에서 참갈겨니는 수심 0.4~0.7 m, 유속 0.4~0.6 m/s로 산정되었다.²⁾ 또한 한강 하천유지유량 산정 결과에 의하면 참갈겨니의 경우, 치어에서 성어기까지 유속과 수심이 0.1~0.6 m/s와 0.1~0.5 m의 범위로 보고하였다.²⁵⁾ 금강유역 하천생태환경 개선 방안 연구 결과에 따르면 피라미는 수심 0.1~1.5(평균 0.5) m 및

Table 3. Variation of HSI of depth and velocity at up and down streams

Watershed	Species	Group	Depth (m)	Velocity (m/s)
Wonju stream	<i>Zacco platypus</i>	Up stream	0.4~0.6	0.1~0.3
		Down stream	0.2~0.4	0.1~0.3
Boseong river	<i>Zacco platypus</i>	Up stream	0.4~0.6	0~0.2
		Down stream	0.3~0.5	0.1~0.3

유속 0~2.0(평균 0.4) m/s의 범위에서 출현한 것으로 보고하였다.²⁶⁾ 이전 조사 결과는 본 조사와 다소 차이를 나타내고 있으나, 서식 범위 내에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 본 연구에서는 각 수계에 위치한 보의 영향을 규명하기 위해 조사지점 및 하천 단면 측정을 보의 직상류 및 직하류에서 실시하였기 때문에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.5. 물리적 서식지 모의 시스템(PHABSIM)에 의한 생태유량 산정

각 수계의 대표어종을 대상으로 PHABSIM을 이용한 유량-가중가용서식지면적(WUA) 관계 및 최적유량의 산정 결과는 Table 4 및 Fig. 8~9에 나타내었다.

Table 4. Variations of flow rates for optimal WUA and WUA rate

Watershed	Group	Discharge (m ³ /s)	Total area (m ² /1000 m)	WUA (m ² /1000 m)	WUA rate (%)
Wonju stream	Up stream	1.1	14,229.3	1,347.7	9.5
	Down stream	0.3	4,292.6	1,142.3	26.6
Boseong river	Up stream	0.4	41,000.0	14,256.8	34.8
	Down stream	2.2	38,626.5	20,592.3	53.3

Fig. 8. Variations of WUA to discharge of up and down streams ((a) Wonju stream, (b) Boseong river).

Fig. 9. Variations of WUA to optimal discharge of *Zacco platypus* (a: Wonju stream, b: Boseong river, 1: Up stream, 2: Down stream).

원주천 피라미의 경우 콘크리트 보 상류구간의 최적유량은 1.1 cms, 하류구간은 0.3 cms로 상류가 하류보다 높게 나타났다. 그에 따른 WUA는 상류구간이 1,347.7 m²/1000 m 및 하류구간은 1,142.3 m²/1000 m로 모의되었다. 조사구간의 전체면적에 대한 WUA 비율은 보 상류 및 하류가 각각 9.5% 및 26.6%로 피라미의 WUA가 많지 않다는 것을 알 수 있다. 원주천은 경사도가 비교적 높고 여름철을 제외한 평수기 및 갈수기에는 유량이 풍부하지 않은 하천으로, 보 상류로는 수량확보를 위해 수심이 깊은 정수역 및 유수역 형태였으며, 보 하류는 상류에 비해 유량이 적고 수심이 낮은 평여울의 형태였다. 따라서 보의 상류 및 하류는 물리적 환경이 서로 상이하였으며, 보로 인한 어류의 이동 단절 및 물리적 서식환경이 다양하지 못한 것으로 확인되었다.

반면 보성강의 피라미는 돌보의 상류 및 하류 구간의 최적유량이 각각 0.4 cms 및 2.2 cms로 산정되었다. 하류의 경우 돌보로 인해 생성된 여울 구간의 영향으로 최적유량이 상류에 비해 높게 산정되었다. WUA는 상류가 14,256.8 m²/1000 m, 하류는 20,592.3 m²/1000 m로 하류에서 넓은 면적으로 나타났다. 조사구간의 전체면적에 대한 WUA 비율은 상류가 34.8%, 하류는 53.3%로 분석되어 원주천의 피라미에 비하여 높게 나타났다. 보성강에 위치한 돌보의 경우 물의 흐름을 차단하지 않기 때문에 상·하류 물리적 서식 환경의 연결성이 유지되었으며, 따라서 어류 생태계에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

본 연구에서 조사된 자료를 기초로 하여 PHABSIM으로 생태유량을 산정한 결과 보의 형태에 따라 상류 및 하류의 최적유량이 상반되게 나타났으며, 이에 따른 WUA도 변화하였다. 각 수계의 우점종인 피라미를 대표어종으로 선정하여 생태유량을 산정하였으나, 추후 군집 및 다른 어종에도 적용하여 생태유량을 제시해주는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 2014년 8월부터 2015년 9월까지 하천의 수리구조물인 보의 형태에 따라 어류 생태계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 원주천의 콘크리트보 및 보성강의 돌보가 위치한 지역에서 조사를 실시하였다. 어류생태 모니터링을 통한 보 상·하류의 어류상, 생물다양도 및 군집 유사도 등의 특성을 파악하고 DB화하였으며, 하천단면과 어류자료를 이용하여 각 수계의 대표어종에 대한 서식지 적합도지수(HSI) 및 물리적 서식지 모의 시스템(PHABSIM)을 통한 최적 생태유량을 산정하였다.

원주천에서 채집된 어류는 총 7과 20종 2,104개체였으며, 보성강은 6과 28종 1,638개체가 출현하였다. 원주천의 우점종은 피라미(39.7%), 아우점종은 참갈겨니(15.2%)였으며, 보성강은 피라미(22.0%) 및 돌마자(17.2%)가 우세종으로 나타났다.

생물다양도 및 군집유사도 분석결과로 판단할 때 원주천의 경우 콘크리트보를 기준으로 상류 및 하류간에 어류의 이동성 및 군집의 연결성이 결여되어진 상태로 판단된다. 보성강의 결과는 일반적인 하천과 유사한 경향으로 돌보의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

서식지적합도지수(HSI) 산정을 위해 원주천 및 보성강의 우점종인 피라미를 대표어종으로 선정하였다. 산정된 서식지적합도지수는 원주천이 수심 0.2~0.6 m 및 유속 0.1~0.3 m/s, 보성강은 수심 0.3~0.6 m 및 유속 0~0.3 m/s의 범위였으며, 상류 및 하류의 서식환경에 따라 차이를 보였다.

PHABSIM을 이용한 최적 생태유량 모의 결과는 원주천의 보 상류가 1.1 cms, 하류는 0.3 cms로 상류가 하류보다 높게 나타났으며, 보성강은 보 상류가 0.4 cms 및 하류는 2.2 cms로 원주천과 상반된 결과를 보였다. 최적유량 적용 시 WUA는 원주천이 상류 9.5% 및 하류 26.6%였고, 보성

강은 상류가 34.8% 및 하류는 53.3%로 분석되었다. 보성강에 위치한 돌보는 물의 흐름을 차단하지 못하고 돌 틈 사이로 어류의 이동이 가능하기 때문에 서식지 교란이 나타나지 않으며, 돌보로 인해 생성된 여울은 물리적 서식환경의 다양성으로 이어져 수생태계에 긍정적인 영향을 미친다고 판단된다.

우리나라의 하천은 대부분 하천사업 등으로 서식지 다양성이 계속 감소되고 있는 추세로 어류에 대한 생물 다양성을 유지하고 생태적 하천 복원을 위해서는 주요어종에 대한 물리 서식 조건을 파악하고 그에 따른 서식지 조성에 노력을 기울여야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 한국건설기술연구원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

References

- Ecoriver21, "Integrated river restoration manual," Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2011).
- Choi, H. S. and Lee, W. H., "A correlation analysis between physical disturbance and fish habitat suitability before and after channel structure rehabilitation," *Ecol. and Resilient Infrastructure*, **2**(1), 33~41(2015).
- Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L. and Naiman, R. J., "The challenges of providing environmental flow rules to sustain river ecosystem," *Ecol. Applicat.*, **16**, 1311~1318(2006).
- Hur, J. W. and Kim, J., "Assessment of riverine health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of yongdam dam," *J. Korea Water Res. Assoc.*, **42**(6), 481~491(2009).
- Hur, J. W., Kang, H. S., Jang, M. H. and Lee, J. Y., "Fish community and estimation of optimal ecological flowrate in up and downstream of Hoengseong dam," *J. Environ. Sci. Int.*, **22**(8), 925~935(2013).
- Oh, K. R., Jeong, S. M. and Lee, J. H., "Analysis of physical habitat variation of *Zacco platypus* by installing small dam in the stream," Proceedings of the 2009 of the Korea Water Resources Association, pp. 491~495(2009).
- Cho, H. J. and Jang, C. L., "Numerical simulation for estimating fish shelter at the downstream of Gumi Weir," *Ecol. and Resilient Infrastructure*, **1**(1), 8~18(2014).
- Choi, J. H., Kim, J. J. and An, K. K., "Fish passage evaluations in the fishway constructed on Seungchon Weir," Proceedings of the 2009 of the Korea Society of Environment and Ecology, pp. 116~116(2009).
- Han J. H., Paek, W. K. and An, K. K., "The application of echo-sounder monitoring in two artificial weirs constructed for "four major river project" and the influence of fish distributions on the weir constructions," Proceedings of the 2009 of the Korea Society of Environment and Ecology, p. 119 (2016).
- Kim, S. K., Kim, C., Lee, S. H. and Kang, E. H., "Determination of fish habitat for Nature Urban Watershed Using PHABSIM," Proceedings of the 2009 of the Korea Water Resources Association, pp. 1404~1407(2004).
- Moir, H. J., Gibbins, C. N., Soulsby, C. and Youngson, A. F., "PHABSIM modeling of Atlantic salmon spawning habitat in an upland stream: testing the influence of habitat suitability indices on model output," *River Res. and Applicat.*, **21**, 1021~1034(2005).
- Jeong, S. M., Lee, J. H. and Kim, D. H., "Evaluation of one and two dimensional physical to fish habitat enhancement," Proceedings of the 2009 of the Korea Water Resources Association, pp. 1068~1072(2006).
- Jeong, M. K., "The fishes of Korea," *Iljisa*, pp. 1~727(1977).
- Jeon, S. R., "Studies on the distribution of freshwater fishes from Korea," Ph.D. Thesis, Choongang Univ., pp. 91(1980).
- Kim, I. S., "Encyclopedia of Korean animals and plants," *Animal (Freshwater fish)*, **37**, 1~629(1997).
- Choi, K. C., Jeon S. R., Kim, I. S. and Son, Y. M., "Coloured illustrations of the freshwater fishes of Korea," pp. 1~234 (1989).
- Kim, I. S., Choi, Y., Lee, C. L., Lee, Y. J., Kim, B. J. and Kim, J. H., "Illustrated book of Korean fishes," Kyohak Publishing Co. Ltd., pp. 613(2005).
- Kim, I. S. and Park, J. Y., "Freshwater Fish of Korea," Kyohak Publishing Co, Seoul, Korea, pp. 1~465(2002).
- Nelson, J. S., "Fishes of the world," John Wiley and Sons, New York, pp. 1~600(1994).
- McNaughton, S. J., "Relationship among functional properties of California Grassland," *Nature*, **216**, 168~169(1967).
- Margalef, R., "Information theory in ecology," *Int. J. General Systems*, **3**, 36~71(1958).
- Pielou, E. C., "Ecological Diversity," Wiley, New York, pp. 1~165(1975).
- Petts, G. E. and Maddock, I., "Flow allocation for in river needs," *Rivers Handbook*, **2**, 289~307(1994).
- Bovee, K. D., Lam, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taklor, J. and Henriksen, J., "Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology," Biological Resources Division Information and Technology Report, USGS, Fort Collins, Colorado, pp. 1~130(1998).
- Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs of Korea, "Survey Report on Water Uses and Instream Water in the Han River System," p. 752(1998).
- Korea Water Resources Corporation, "Assessment of River Ecological-environment for Sustainable Development - Case study of Geum River Basin," p. 110(2009).