

흑천수계의 어류상 및 군집분석

문운기^{1,2} · 한정호¹ · 안광국^{1,*}

(¹충남대학교 생명과학과, ²청록환경생태연구소)

Fish Fauna and Community Analysis in Heuck Stream Watershed. Moon, Woon Ki^{1,2}, Jeong-Ho Han¹ and Kwang-Guk An^{1,*} (¹Department of Bioscience and Biotechnology, College of Biological Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ²Chungrok Environmental Ecosystem Research Institute, Gyeonggi-do 431-070, Korea)

This study was conducted at 25 sites of 6 mainstreams and 19 tributaries sites within Heuck Stream watershed during May~October 2003 for the survey of fish distributions, compositions, and community characteristics. The survey showed that total fish was identified as 9 family and 26 species in all sites, and Cyprinidae dominated the community as 15 species. The dominant species of >20% of the total were *Zacco temminckii* (29%), *Zacco platypus* (22%), and *Rhynchocypris oxycephalus* (21%) in the watershed. Community analysis, based on the stream spatial gradients, indicated composition differences along the main axis of the stream from the headwater to the downstream; *R. oxycephalus* predominated in the most headwater zone and *Z. temminckii* dominated in the lower headwater zone, whereas *Z. temminckii*-*Z. platypus* dominated in the mid-to-downstream, and *Z. platypus* dominated the community in the most downstream zone. Total endemic species was 7 family and 15 species, which is made of 50% in the fish community, so that the high proportion of endemic species indicated a healthy region in terms of fish community, compared to average 23% in Korean peninsula in general. The total number and species of fish increased as the stream order (stream size) increased, indicating that impacts on chemical pollution or habitat disturbance were not so large to the fish community in this watershed. Trophic and tolerance guilds analysis showed that relative proportions of sensitive and insectivore species were >50% in the watershed and decreased as the stream order increased, whereas relative proportions of tolerant and omnivore species showed an opposite results. These outcomes suggest that the natural condition of watershed is preserved relatively and the region should be protected from the chemical and habitat disturbance by agricultural activity and urban developments.

Key words : Heuck Stream, fish fauna, watershed, stream order, endemic species, composition

서론

하천 생태계는 여러 가지 요인들, 특히 인간에 의한 인위적인 간섭에 의한 수환경 변화로 인하여 하천에 서식

하는 어류의 분포 특성과 영향을 끼치고 있다(Rutherford *et al.*, 1987). 수계 주변에 산재하고 있는 경작지 및 농경지는 작물의 높은 생산량을 위해 농약 및 비료의 무분별한 사용으로 인하여 화학물질 및 유기물의 과다유입으로 이어져 부영양화를 비롯한 각종 수생태계의 문제점

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

을 일으키고 있다. 하천을 중심으로 형성된 하천수계 및 유역은 높은 생산력을 지닌 고유의 생태계를 유지하여 왔다. 그러나 최근 들어 각종 비점오염원이나 영양염류의 과다 유입으로 인하여 수계의 서식환경이 악화됨으로써 하천의 생산력이 감소되고, 서식하는 생물종이 급격히 줄어들고 있는 실정이다.

담수 생태계의 대표적인 생물군인 어류는 수생태계의 최상위 먹이사슬에 있고, 다른 생물군에 비해 장시간의 생활사를 가지고 있으며, 중 동정이 용이하고, 수질오염 및 생태계 교란에 대한 중별 생태지표 특성(내성도 및 섭식 길드)이 다르기 때문에 수환경지표로 널리 이용되고 있다(Jones *et al.*, 2005). 그러나 어류는 하천의 수질 악화, 과도한 어획, 또는 외래어종의 침입으로 인하여 종 조성 및 종 다양성에 큰 악영향으로 작용하고 있다(Garcia and Cochrane, 2005). 이러한 악영향은 국내어종의 먹이사슬 구조의 변화와 외래종의 대량 우점현상을 초래하기도 한다(Pikitch *et al.*, 2004). 또한 수계 주변에 급격한 인구증가와 맞물려 수계 내 생물의 종 다양성 및 민감종의 감소, 혹은 내성종의 증가 등과 같은 생태학적 교란이 하천생태계의 종합적인 질적저하를 일으키고 있는 실정이다. 이처럼 인간의 직·간접적인 영향은 특정서식지를 선호하는 어종의 감소를 초래하고 있다.

최근 북미 및 유럽에서는 급격히 가속되는 다양한 생태교란 및 이에 대한 제반작업으로 수생태계 건강도 평가 및 생태복원작업이 활발히 이루어지고 있다. 기존의 수체 평가자들은 급속도로 악화되는 수중 생태계 오염을 파악하기 위한 일환으로서 화학적 모니터링을 이용해 왔다(US. EPA, 1991). 그러나 수질악화는 화학적 오염뿐만 아니라 유로변경 및 유량변동, 물리적 하상구조의 변경 등에 의해 크게 손상되기 때문에, 단순 화학적 평가만으로는 수계내의 총체적 건강 상태를 진단 할 수 없다(Karr, 1981; Judy *et al.*, 1984; Karr *et al.*, 1986). 이런 이유로서 최근 미국 환경부(US. EPA)에서는 어류를 이용한 생물학적 모니터링 및 생태계 건강성 평가가 광범위하게 이용되고 있다(Barbour *et al.*, 1999). 이런 평가는 현행 생태건강도 평가뿐만 아니라 향후 생태복원 및 수계의 수질관리에 핵심적인 역할을 한다.

현재 우리나라는 삶의 질적 향상과 더불어 생태계에 대한 국민적 관심이 증가하고, 또한 정부도 국가적 차원에서 수질 및 수생생물을 통합적으로 관리하기 위한 총량 관리규제법, 사전환경성 검토 및 친환경적복원성향 등의 강화와 같은 효율적인 수환경 관리체제를 도입하여 관리를 강화하고 있다. 우리나라에서는 현재까지 한강 수계(안 등, 2001a), 금강 수계(안 등, 2001b; 안과 김, 2005;

안 등, 2005; 배와 안, 2006) 및 낙동강 수계(염 등, 2000; 권과 안, 2006) 등에 적용하여 하천 생태계 건강성을 평가하고 있다. 한편, 우리나라에서는 2003~2006년까지 물환경 종합평가의 일환으로 개발된 “물환경 종합평가방법 개발 조사연구(환경부, 2004, 2005, 2006)”를 통하여 어류에 의한 건강성 평가(안 등, 2006)가 소개되면서 하천 생태계 건강성 평가가 4대강을 중심으로 하여 정부의 주도하에 대대적으로 실시되고 있다(환경부, 2007).

따라서 본 연구에서는 첫째, 한강 수계의 지방 2급 하천인 흑천을 대상으로 하여 어류 군집 모니터링을 실시하여, 수체 내 다양한 생물군 중 어류 군집을 이용하여 생물학적인 수환경을 평가하고, 이를 통하여 하천생태계의 어류 군집 특성을 진단하고자 하는 데 그 목적이 있다. 둘째, 흑천수계를 구성하고 있는 하천의 특성 및 담수 어류의 미세 분포상 및 군집구조를 밝혀 과거와의 어류상 비교를 통해 서식환경에 따른 종 다양성 보전을 위한 기초자료로 제시하고자 한다. 마지막으로 어류의 지리적 분포와 그 변화양상 및 생태를 파악하여 어류의 지리적 구계설정, 이동경로, 진화 등의 학술적인 내용뿐만 아니라 수자원 개발 및 보존에 있어 기초 자료가 되기 때문에 종의 보전 및 복원 시 중요한 자료로 작용할 수 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구의 대상 하천인 흑천은 경기도 양평군 청운면 도원리 금물산에서 발원하여 개군면 양덕리에서 남한강과 합류하며, 양평읍 원덕리부터는 상수원보호지구로 관리되어지고 있는 지방 2급 하천으로서 총 연장 37km, 유역면적 282.55 km²로, 제2차 전국자연환경조사를 위하여 경부에서 설정한 우선 조사수역인 양평 수역으로 남한강지류인 하천이다. 또한, 흑천 주변지역은 1,000 m가 넘는 용문산(1,157 m)과, 800 m가 넘는 도일봉(862 m)이 위치하고 있으며, 북쪽으로는 북한강의 큰 지류인 홍천강이 북한강 본류인 청평호로 흘러들어가며, 남쪽으로는 흑천이 남한강으로 흘러들어가는 특징을 가지고 있다. 홍천강은 주로 산간 계곡형의 지리적 특징을 보이는 반면, 흑천은 평야지대를 흐르는 하천으로 주변에 농경지가 많이 발달되어 있는 특징을 보여주고 있다.

흑천은 14개의 지류들이 흑천의 유로를 부분적으로 바꾸었으며, 산간분지 말단부 구릉지나 산록완사면에 부분적으로 구유로의 흔적을 보이고 있다. 또한 하천 직강화 공사와 저수지 건설로 인해 기존의 유로에 과도한 퇴적물

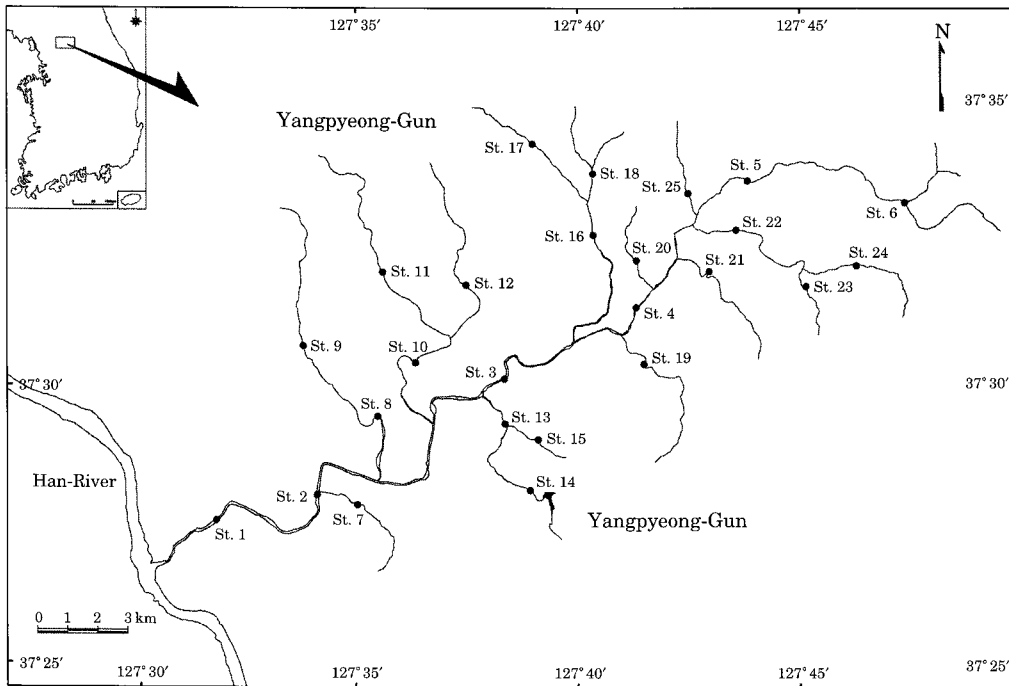


Fig. 1. Map showing sampling sites in Heuck Stream Watershed.

이 공급되면서 수심이 0.6~3.0 m로 얕아져 있으며, 하천 구조는 대부분이 바위 및 자갈로 구성되어 있고, 부분적으로 저질이나 모래가 형성되어 있어, 하천 내에 식생이 정착한 구간도 나타나고 있다. 흑천에 관한 연구로는 최(1986)에 의해 양평군에 분포하는 어류의 전반적인 조사, 팔당호를 비롯한 저수지를 중심으로 한 연구(홍, 1991)에서 남한강 하류역의 어류상 중 일부 언급되어 있으며, 양과 김(2005)에 의해 진행된 제2차 전국자연환경조사에서 흑천 본류에 대한 어류상이 언급되어 있으나 흑천수계의 전반적인 어류상 및 분포특성에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

2. 조사기간 및 조사지점

흑천수계를 구성하는 하천들의 하천환경 및 서식어류에 대한 현지조사는 2003년 5월부터 2003년 10월까지 3회에 걸쳐 진행되었으며, 흑천 본류 6구간 및 14개소의 각 지류하천별로 1개 및 2개 구간을 선정하여 총 25구간에 대해 어류 조사를 수행하였다. 각 조사하천 및 조사구간은 다음과 같다(Fig. 1).

흑천본류

- St. 1: 경기도 양평군 양평읍 회현리
- St. 2: 경기도 양평군 용문면 삼성리

- St. 3: 경기도 양평군 용문면 광탄리
- St. 4: 경기도 양평군 단월면 삼가리
- St. 5: 경기도 양평군 청운면 다대리
- St. 6: 경기도 양평군 청운면 신론리

흑천지류

- St. 7: 경기도 양평군 용문면 삼성리, 삼성천
- St. 8: 경기도 양평군 용문면 다문리, 연수천
- St. 9: 경기도 양평군 용문면 연수리, 연수천
- St. 10: 경기도 양평군 용문면 덕촌리, 용문천
- St. 11: 경기도 양평군 용문면 신접리, 용문천
- St. 12: 경기도 양평군 용문면 중원리, 중원천
- St. 13: 경기도 양평군 지제면 송현리, 지평천
- St. 14: 경기도 양평군 지제면 지평리, 지평천
- St. 15: 경기도 양평군 지제면 월산리, 월산천
- St. 16: 경기도 양평군 단월면 덕수리, 부안천
- St. 17: 경기도 양평군 단월면 행소리, 부안천
- St. 18: 경기도 양평군 단월면 부안리, 대왕천
- St. 19: 경기도 양평군 양동면 고송리, 고송천
- St. 20: 경기도 양평군 단월면 비룡리, 덕수천
- St. 21: 경기도 양평군 청운면 가현리, 벗고개천
- St. 22: 경기도 양평군 청운면 용두리, 용두천
- St. 23: 경기도 양평군 청운면 갈운리, 용두천
- St. 24: 경기도 양평군 청운면 갈운리, 갈운천

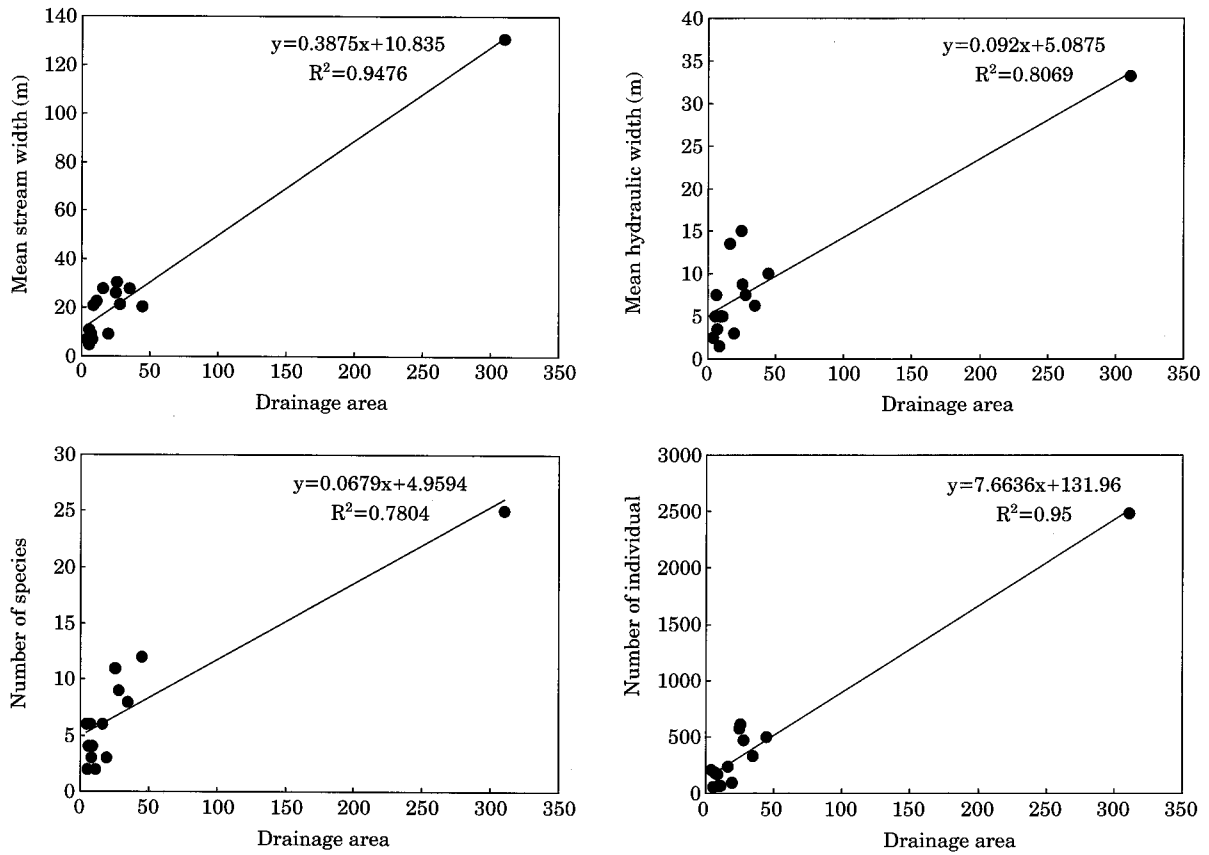


Fig. 2. Comparison between mean stream width and mean hydraulic width, number of species, number of individual for drainage area (km²) in Heuck Stream Watershed.

St. 25: 경기도 양평군 청운면 여물리, 여물천

3. 조사방법

흑천수계의 각 조사 구간에서 어류의 채집은 상·하류 100 m의 구간을 선정한 후, 투망(망목: 5×5 mm)과 죽대(망목: 4×4 mm)를 사용하여 조사를 실시하였으며, 각 조사구간에서 동일하게 투망은 10회, 죽대는 30분간 조사를 실시하였다. 또한, 하천특성상 투망의 사용이 부적합한 구간들의 경우 죽대만을 사용하여 조사를 실시하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정 및 개체수 파악 후 놓아주었으며, 정확한 동정이 요구되거나, 죽은 개체 및 표본의 필요시 10% 포르말린용액에 고정 후 실험실로 운반한 다음 동정·분류를 실시하였다. 어류의 동정에는 국내에서 발표된 검색표(정, 1977; 김, 1997; 최, 2001; 김과 박, 2002)를 이용하였고, 분류체계는 Nelson(1994)의 분류체계를 참조하였다. 흑천수계의 하천차수(Stream order)는 Strahler(1957)의 방법을 따라 1:120,000의 축척지도를 이용하여 하천차수를 결정하였다. 또한, 수계의 군

집특성은 우점도 지수(Simpson, 1949), 종 다양도 지수(Shannon and Weaver, 1963), 종 풍부도 지수(Margalef, 1958), 종 균등도 지수(Pielou, 1969) 등을 산출하여 어류 군집특성을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 흑천수계의 물리적 수환경 특성

본 조사수계인 흑천수계는 남한강 하류역으로 유입되는 제1지류 및 제2, 3지류를 형성하고 있으며, 25개의 각 조사지점들은 Strahler(1957)의 하천차수(Stream order) 기준에 의거할 때 1~4차 하천으로 구성되어 있다. 흑천수계의 집수역은 경기도 양평군 양평읍, 개군면, 지체면, 용문면, 단월면, 청운면, 양동면 지역이 포함되어 수계가 구성되어 있다(국토해양부, 2000). 수계를 구성하는 하천 주변의 토지이용으로는 자연산림(임야), 농경지 및 주거지(민가)로 구분되어 있으며, 수계 주변의 경관이 양호하

Table 1. In-stream characteristics of Heuck Stream Watershed.

Stations	Structure									
	Stream order	Stream width (m)	Hydraulic width (m)	Mean depth (m)	Structure of bottom	Landuse pattern	Interfere of bank (L/R)	Stream length (km)	Drainage area (km ²)	
Heuck Stream	St. 1	4	190 (180~200)	40 (30~50)	1.0	Be, Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	S/N	37.00	310.53
	St. 2	4	190 (180~200)	60 (50~70)	1.0	Bo, Pe, Sa	FA, CL, AG	N/N		
	St. 3	4	160 (150~170)	30 (20~40)	1.0	Be, Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	N/N		
	St. 4	4	175 (150~200)	55 (30~80)	1.0	Bo, Pe, Sa	FA, CL	C/N		
	St. 5	3	50 (40~60)	10 (5~15)	0.7	Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	N/N		
	St. 6	3	19 (18~20)	4 (3~5)	1.0	Be, Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	C/S		
Samsung Stream	St. 7	1	5 (4~6)	7.5 (0.5~1)	0.4	Be, Bo, Pe, Sa	FA, RA	N/N	4.50	5.80
Yeonsu Stream	St. 8	2	42.5 (40~45)	12.5 (10~15)	1.0	Be, Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	N/S	10.00	25.53
	St. 9	2	19 (18~20)	5 (4~6)	0.4	Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	N/N		
Yongmun Stream	St. 10	3	27.5 (25~30)	13.5 (12~15)	0.8	Be, Bo, Pe, Sa	FA, CL	N/N	12.00	44.86
	St. 11	2	13.5 (12~15)	6.5 (5~8)	0.6	Bo, Pe, Sa	FA, RA, CL	N/N		
Jungwon Stream	St. 12	3	28 (26~30)	13.5 (12~15)	0.8	Bo, Pe, Sa	RA, CL	N/N	7.30	15.90
Jipyong Stream	St. 13	2	47.5 (45~50)	22.5 (20~25)	1.0	Pe, Sa	CL	N/N	9.00	24.70
	St. 14	2	5 (4~6)	7.5 (0.5~1)	0.4	Be, Bo, Pe, Sa	FA, CL	N/N		
Wolsan Stream	St. 15	1	9 (8~10)	3.5 (3~4)	0.5	Pe, Sa	CL	C/C	3.00	7.00
Buan Stream	St. 16	3	42.5 (40~45)	9 (8~10)	0.7	Bo, Pe	FA, CL	N/S	9.50	34.78
	St. 17	2	13.5 (12~15)	3.5 (3~4)	0.4	Bo, Pe, Sa	RA, CL	N/N		
Dewang Stream	St. 18	2	21 (20~22)	5 (4~6)	0.4	Bo, Pe	RA, CL	N/N	4.30	8.90
Gosong Stream	St. 19	2	9 (8~10)	3 (2~4)	0.3	Bo, Pe, Sa	RA, CL	S/S	7.00	19.23
Duksoo Stream	St. 20	1	7 (6~8)	2.5 (2~3)	0.3	Pe, Sa	FA, RA, CL	N/N	3.50	4.20
Beukgogae Stream	St. 21	2	7 (6~8)	1.5 (1~2)	0.3	Be, Bo, Pe	FA	N/N	5.50	8.20
Yongdu Stream	St. 22	3	37.5 (35~40)	12.5 (10~15)	1.0	Bo, Pe, Sa	FA, CL	S/N	7.50	27.93
	St. 23	2	5.5 (5~6)	2.5 (2~3)	0.3	Be, Bo, Pe	FA, CL	N/N		
Garun Stream	St. 24	2	22.5 (20~25)	5 (4~6)	0.3	Bo, Pe	RA, CL	S/S	5.50	11.00
Yeomul Stream	St. 25	2	11 (10~12)	5 (4~6)	0.3	Pe	CL	S/S	3.50	5.43

The bottom structure (Be=bedrock, Bo=boulder, Pe=pebble, Sa=sand). The landuse patterns (FA=forest area, RA=residential area, CL=crop land, AG=amusement ground), Interferes of bank (R=right-side, L=left-side, N=none, C=concrete, S=stone)

Table 2. The list and individual number of fish species collected, various guild analysis form Heuck Stream Watershed.

Species	Stations																				RA (%)										
	Tol.	Tro.	Hab.	HS	SS	YS	YMS	JS	JPS	WS	BS	DS	GS	DSS	BGS	YDS	CBS	YES	Total												
	G	G	G	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	-													2													2	0.03	
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	-	3	2	1	1					1	1	1	1	20	1	4					1						36	0.58	
<i>Rhodeus pseudosericeus</i> *	TS	O	-			2	12																						14	0.22	
<i>Acheilognathus yamatsutae</i> *	SS	O	-	23	16	7	6						2																54	0.87	
<i>Pungtungia herzi</i>	SS	I	RB	28	36	19	27				24	2	19	3	30	15	16	18	4				2						261	4.19	
<i>Coreoleuciscus splendidus</i> *	SS	I	RB	27	49	46	3	26			12	28																	191	3.06	
<i>Squalidus gracilis majimae</i> *	TS	I	-			3	2				3		27	1	33														71	1.14	
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> *	TS	O	-	7																									7	0.11	
<i>Hemibarbus longirostris</i>	SS	I	-	12	8	11	7	33				2	2																81	1.30	
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	-	10	6	13	12	12								17			2										72	1.16	
<i>Microphysogobio yaluensis</i> *	IS	O	RB	54	58	58	61																						231	3.71	
<i>Microphysogobio longidorsalis</i>	SS	O	RB			92	48																						140	2.25	
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS	I	-					6	131	140		48	97	26	26	47	92	174	96	57	52	72	63	28	72	66	56		1323	21.23	
<i>Zacco temminckii</i>	SS	I	-			81	171	196	51	37	194	199	172	67	170							39	90	106	149	84			1806	28.98	
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	-	234	190	125	77	47	12		55	45				287	95	57				43							1304	21.89	
<i>Koreocobitis rotundicaudata</i> *	SS	O	RB	3	1	12	2	6	1			6																	31	0.50	
<i>Isokohamia koreensis</i> *	SS	I	RB	13	10	2	11	11	10		27	2	22	7	1	1	1			2									120	1.93	
<i>Pseudogobius koreanus</i> *	IS	C	RB	10	5	5	5			1																			26	0.42	
<i>Silurus asotus</i>	TS	C	-	1		1	1																						3	0.05	
<i>Silurus microdorsalis</i> *	SS	C	RB						1			1					4			2									8	0.13	
<i>Liobogrus andersoni</i> *	SS	I	RB	6	1	7	2	6			6								1										29	0.46	
<i>Cottus poecilopus</i> *	SS	I	RB					5		3							25	17	9										59	0.95	
<i>Siniperca scherzeri</i>	SS	C	RB	4																									4	0.06	
<i>Coreoperca herzi</i> *	SS	C	RB	17	19	16	7			5		12	7	1					1										85	1.36	
<i>Odontobutis platycephala</i> *	IS	C	RB					1	3	6		3	5	10						1	3	1	2	1	2	1	8	1	49	0.79	
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB	20	25	28	32	20							10	29													164	2.63	
Number of individuals				472	426	529	487	369	209	186	321	286	311	187	238	387	189	174	210	116	69	94	209	171	303	164	67	57	6231	100.00	
Number of species				17	14	19	19	12	7	4	8	7	11	7	6	9	6	6	6	4	4	4	3	6	3	9	3	2	2	26	

*: Endemic species, •: Endangered species, Tol. G: Tolerance Guild (SS: Sensitive species, IS: Intermediate species, TS: Tolerance species), Tro. G: Trophic Guild (I: Insectivore, O: Omnivore, C: Carnivore, H: Herbivore), Hab. G: Habitat Guild (RB: Riffle benthic), HS: Heuck Stream, SS: Samsung Stream, YMS: Yeonsu Stream, YMS: Yeongmun Stream, JS: Jungwon Stream, JPS: Jipyong Stream, WS: Wolsan Stream, BS: Buan Stream, DS: Dewang Stream, DSS: Duksoo Stream, BGS: Beukogae Stream, YDS: Yongdu Stream, GRS: Garun Stream, YES: Yeomul Stream

여 위탁 및 숙박시설, 음식점 등의 휴양시설과 주거지 등 비점오염원이 많이 분포하고 있으나, 하천 내 수환경에 대한 직접적인 영향(수질오염 등)은 미미한 것으로 판단된다.

본 수계의 본류 구간은 과거에 발생한 홍수 및 집중호우로 인해 일부구간 수해복구 공사가 진행되었으며, 주거지 및 농경지가 분포하는 일부 구간의 경우에는 하안(Stream bank) 및 제방이 콘크리트 옹벽 또는 석축 등 인공적인 구조물로 정비되어 있어 어류의 서식환경이 악화된 구간이 존재한다. 한편, 이들 구간을 제외한 상류 구간에서는 자연 제방으로 사행천(Meander)의 형태를 보이고 있다. 본류의 수심은 농업용수 확보 등의 목적에 의해 보가 설치된 지역을 포함하여 대부분 1~3 m 내외의 다양한 깊이를 보이고 있다.

흑천의 지류하천들은 하천차수가 1~2차로 전형적인 산간 계류성 하천의 특성을 보이고 있으며, 하상의 구조는 대부분 큰돌(Boulder, Bo), 자갈(Pebble, Pe)로 구성되어 있고, 일부구간이 암반(Bedrock, Be), 모래(Sand, Sa) 등을 포함하고 있다. 또한, 수변에 피복되어 있는 일부 초본류 등이 침수된 상태로 어류 치어의 서식처 및 은신처로 이용되는 등 비교적 다양한 서식환경을 제공하고 있는 특징을 보인다(Table 1).

2. 어류상

본 조사기간 동안 흑천수계에서 서식이 확인된 어류는 총 9과 26종이었으며, 6,231개체가 채집되었다(Table 2). 서식이 확인된 어류 중에서 잉어과(Cyprinidae) 어류가 15종(57%)으로 다른 분류군에 비해 출현종이 가장 높게 나타났으며, 다음으로 미꾸리과(Cobitidae), 메기과(Siluridae), 꺾지과(Centropomidae) 어류가 각각 2종(8%), 둥자개과(Bagridae), 통가리과(Amblycipitidae), 독중개과(Cottidae), 동사리과(Odontobutidae), 망둑어과(Gobiidae) 어류가 각각 1종(4%)씩 출현한 것으로 나타났다. 출현 어류 중 잉어과에 속하는 종이 다른 분류군에 비해 높게 나타나는 것으로 분석되었는데 이는 한강유역 및 국내 담수역에서 나타나는 일반적인 현상이며(최 등, 1984), 국내에 서식이 확인된 담수어류 중 잉어과 어류들이 다른 분류군에 포함된 어류들보다 보다 더 다양하게 분포하는 특성과도 일치한다. 또한, 흑천수계에서 출현한 어류 중 메기과, 꺾지과 등 수환경에서 먹이연쇄의 상위계층에 속하는 육식성 어류가 흑천수계를 구성하는 본류 및 지류하천들에서 고르게 분포하는 것으로 나타나 양호한 에너지 흐름, 서식환경 및 어류상이 유지되고 있는 것으로 사료

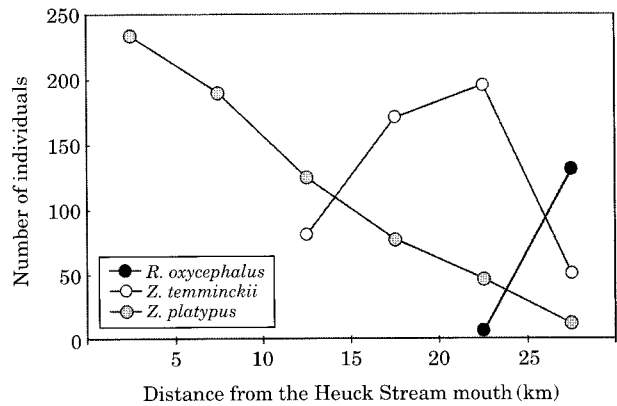


Fig. 3. Comparison between *Z. temminckii*, *Z. platypus*, and *R. oxycephalus* of number of individuals collected in distance from the headwater of Heuck Stream.

된다.

서식이 확인된 어류 중 흑천수계에서 상대풍부도(RA, %)가 가장 높게 나타난 종은 갈겨니(*Zacco temminckii*)로 1,806개체(29%)가 채집되어 우점종으로 나타났으며, 피라미(*Zacco platypus*)가 1,364개체(22%), 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*)가 1,323개체(21.2%)로 아우점종으로 나타났다. 흑천수계에서 상대풍부도가 높게 나타난 갈겨니, 피라미, 버들치 3종의 분포 특성을 살펴보면, 버들치의 경우 산간계류의 찬물이나 강의 상류역에 서식하는 특성을 가지고 있으며, 갈겨니는 하천의 중·상류역에, 피라미는 하천 중·하류역에서 흔히 출현하는 분포 특성을 보인다(이와 노, 2006). 본 연구에서도 흑천 본류에서 이들 종의 분포 특성은 하류역(St. 1) 구간에서 피라미가 가장 풍부하게 출현하였으며, 상류역으로 갈수록 감소하는 특성을 보였으며, 갈겨니는 중류역(St. 3) 구간에서 출현하여 상류역(St. 5) 구간에서 196개체로 높은 풍부도를 보였다. 또한, 버들치의 경우는 상류역(St. 5) 구간에서 출현하여 최상류역(St. 6)구간에서 131개체로 가장 높은 풍부도를 보였다. 이와 같은 결과는 흑천 본류의 경우 중-하류역은 피라미, 중-상류역은 피라미, 갈겨니, 상류역은 갈겨니, 최상류역은 버들치가 주로 우점하는 것으로 나타나 기존의 연구 결과와도 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 3).

해당지역의 생물상을 특정 짓는 기준이 되는 한국고유종(노, 2009)은 서식이 확인된 62종의 어류 중 한강남줄개(*Rhodeus pseudosericeus*), 줄납자루(*Acheilognathus yamatsutae*) 등을 포함하여 7과 13종(21%)으로 확인되어 고유종의 구성비가 한반도의 평균적인 고유종 빈도인

Table 3. Community analysis in Heuck Stream Watershed.

Indices	Stations																									Total	
	HS	3	4	5	6	7	8	9	YS	YMS	JS	12	13	JPS	14	15	WS	BS	17	18	DS	GS	DSS	BGS	YDS		GRS
Dominance (λ)	0.27	0.25	0.14	0.18	0.32	0.46	0.61	0.40	0.52	0.35	0.40	0.54	0.56	0.35	0.40	0.70	0.71	0.70	0.48	0.35	0.52	0.36	0.46	0.97	0.97	0.18	
Diversity (H')	1.92	1.85	2.28	2.10	1.65	1.06	0.71	1.26	0.95	1.51	1.15	0.92	1.01	1.24	1.10	0.63	0.55	0.59	0.80	1.15	0.72	1.27	0.85	0.08	0.09	2.13	
Richness (d)	2.60	2.15	2.87	2.91	1.86	1.12	0.57	1.21	1.06	1.74	1.15	0.91	1.34	0.95	0.97	0.94	0.63	0.71	0.44	0.94	0.39	1.40	0.39	0.24	0.25	2.86	
Evenness (J')	0.68	0.70	0.77	0.71	0.66	0.54	0.51	0.61	0.49	0.63	0.59	0.51	0.46	0.69	0.62	0.35	0.40	0.42	0.73	0.64	0.65	0.58	0.78	0.11	0.13	0.65	

HS: Heuck Stream, SS: Samsung Stream, YS: Yeonsu Stream, YMS: Yongmun Stream, JS: Jungwon Stream, JPS: Jipyong Stream, WS: Wolsan Stream, BS: Buan Stream, DS: Dewang Stream, GS: Gosong Stream, DSS: Duksoo Stream, BGS: Beukgogae Stream, YDS: Yongdu Stream, GRS: Garun Stream, YES: Yeomul Stream

23%(남, 1996)보다 다소 낮게 나타난 것으로 분석되었다. 흑천본류의 경우 출현한 9과 25종 중 한국고유종이 7과 13종(52%)으로 고유종의 비율이 높게 나타났으며, 지류하천 중 비교적 하천규모가 크고, 인위적 간섭이 적게 발생하여 서식환경이 양호한 연수천의 경우 출현한 6과 11종 중 한국고유종이 6과 7종(64%)으로 다른 지류하천들에 비해 고유종 비율이 높게 나타났다. 일부 지류하천들을 제외하고는 고유종의 비율이 높게 나타나는 구간들의 공통적인 특징은 어류 서식에 악영향을 줄 수 있는 인위적 교란이 적었으며, 하상의 구조가 대부분 큰돌 및 자갈 등으로 구성되어 있어 어류의 서식 공간이 되는 하상공극을 많이 포함하고 있는 특징을 보였다. 또한, 수계의 종적 구배 특성 중 흑천이 중·상류성 하천의 특성을 보여 상류부에 점오염원 및 비점오염원이 거의 없어 이화학적 수질 상태가 양호하고, 유속이 빠른 특성을 보이고 있기 때문에 수계 내 고유종의 구성비가 높은 것으로 사료되었다.

한편, 이전 연구인 최(1986)의 연구에서는 흑천수계가 위치하는 경기도 양평군 일대의 저수지 및 하천을 포함한 담수역에서 13과 55종, 홍(1991)은 본 흑천수계를 포함한 남한강 하류역에서 13과 58종을 보고하였다(Table 3). 이들 자료에 근거하여 남한강 하류역에 분포하는 어류는 총 14과 61종으로 나타났으며, 이 중 본 조사를 통해 9과 26종의 서식이 확인된 흑천수계는 남한강 하류역에 분포하는 어류에 대해 약 42.6%의 구성 비율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 본 조사지역이 흑천수계에만 국한되어 이루어진 자료인 것과 더불어, 과거의 서식환경에 비해 근래에 하천치수의 목적으로 실시된 하천정비, 농업용수 등의 용수확보를 위한 낙차공 및 보 건설, 레저, 휴양시설 등의 건립에 의한 인위적 교란에 의한 어류의 이동 장애 및 인구증가 등에 따른 수질악화 등 하천 내 서식환경 변화에 따른 악영향이 어종의 다양성을 감소시킨 원인이 된 것으로 판단된다. 또한, 최근 양과 김(2005)에 의해 보고된 흑천 본류 및 일부 지류하천들에서 출현한 7과 21종이 어류군집 분포와도 비교하였을 때, 약 80%의 구성 비율을 보이는 것으로 나타나 본 조사에 비해 적은 종의 분포를 보고하였으나, 이는 조사시기, 조사지점 및 조사방법의 차이로 인한 결과로 사료되었다. 최(1986), 홍(1991) 및 양과 김(2005)의 연구에 의하면, 본 수계를 포함한 남한강 하류역에 잉어과의 묵납자루(*Acheilognathus signifer*), 가는돌고기(*Pseudopungtungia tenuicarpa*), 꾸구리(*Gobiobotia macrocephala*), 돌상어(*Gobiobotia brevibarba*)와 독종개과의 독종개(*Cottus koreanus*) 등 2과 5종의 환경부지정 멸종위기야생동물 II급인 어종이

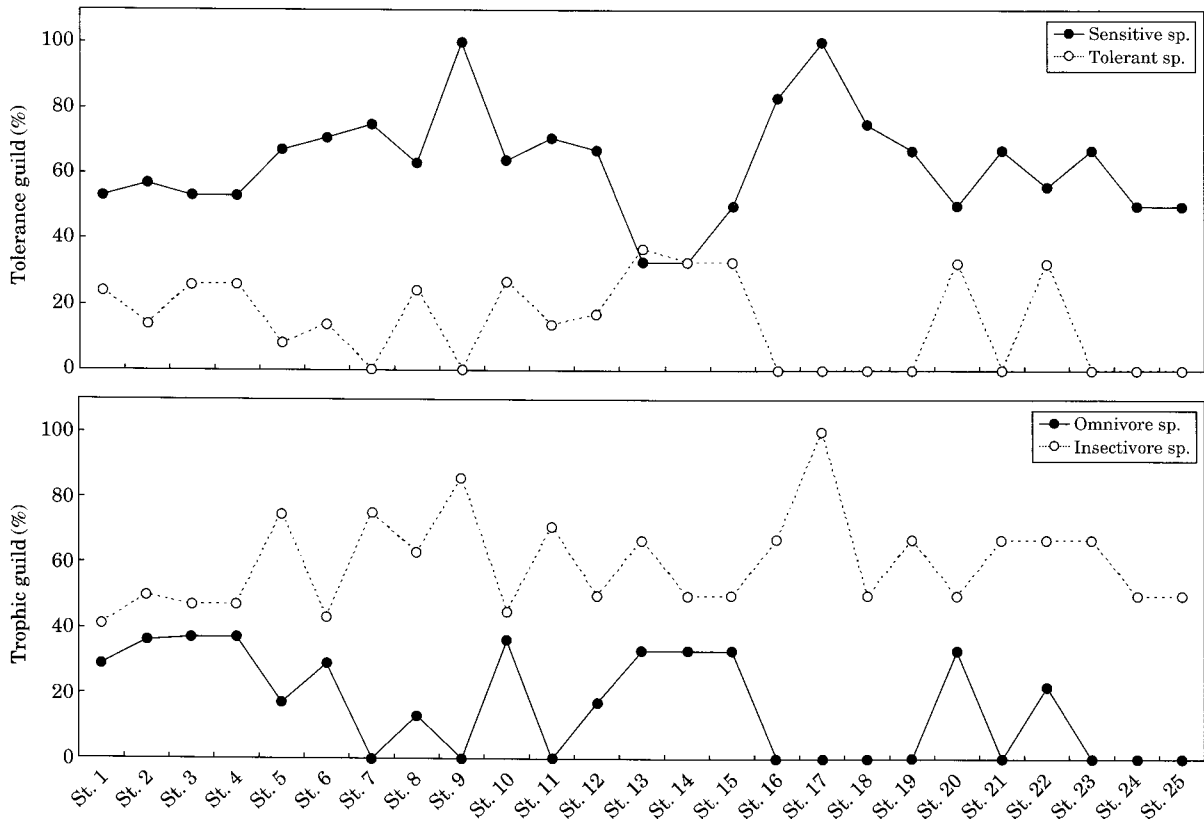


Fig. 4. Tolerance guild and trophic guilds in the sampling sites of Heuck Stream Watershed.

서식하고 있는 것으로 보고되었으나, 본 조사에서는 흑천 본류(St. 5)와 삼성천(St. 7), 부안천(St. 16~17), 대왕천(St. 18)에서 독중개 1종만이 출현하였을 뿐 나머지 어종의 서식은 확인되지 않았다. 따라서 추가 조사를 통해 기존에 서식이 확인되었던 보호종들의 서식여부 파악 및 이들 종의 보존을 위한 향후 대책이 필요한 것으로 사료되었다.

3. 내성도 및 트로픽 길드 분석

Karr(1981)와 US. EPA(1991)에 의하면 민감종 수 및 개체수는 하천에서의 유기물 오염, 서식지 파괴 등에 의한 서식지의 물리·화학적·질적 하강에 따라 그 풍부도가 감소하고, 내성종이 증가하는 경향을 보인다고 보고되고 있다. 흑천수계에서 서식이 확인된 종 및 개체수에 대한 내성도 길드(Tolerance guild) 분석 결과, 민감종(Sensitive species)은 전체 출현종에 대해 54%, 개체수 측면에서 67%로 나타났으며, 내성종은 전체 출현종에 대해 27%, 개체수 측면에서 28%로 나타나 민감종의 우점하고 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 흑천수계의 서식환경 및 이화학적 수질이 양호하며, 일부 구간을 제

외한 대부분의 지류성 하천들이 인위적인 교란이 없는 자연하천으로 어류 서식처 및 산란처가 많이 존재하기 때문에 나타난 결과로 사료되었다(Fig. 4).

하천의 자연성 및 서식환경이 악화되면 층식종의 상대 비율이 감소하는 특성을 이용하여 하천의 서식환경 정도를 간접적으로 파악할 수 있는 트로픽 길드(Trophic guild) 분석 결과에 의하면 잡식종(Omnivore)은 전체 출현종에 대해 35%, 개체수 측면에서 30%로 나타난 반면, 층식종(Insectivore)은 전체 출현종에 대해 42%, 개체수 측면에서 67%로 나타나 층식종이 우세한 현상을 보였다(Fig. 4). 이 등(2007)의 이전 연구에서 남한강 상류 수계에서 층식종이 15개 조사지점 중 10개 지점에서 90% 이상 출현하여 서식환경 보전이 잘 되어 있는 수계로 보고 하였으나, 본 연구에서는 이에 비해 낮은 비율을 보였는데, 이는 조사 구간의 지리적인 차이 때문인 것으로 판단되었다. 그러나 층식종의 구성 비율이 50% 이상 되는 지점들이 전체 25개 조사 구간 중 20개 구간이 높게 나타나 하천의 자연성과 물리적 서식환경이 비교적 양호한 것으로 사료되었다(Fig. 4).

내성종 및 잡식종의 비율이 다른 하천에 비해 비교적

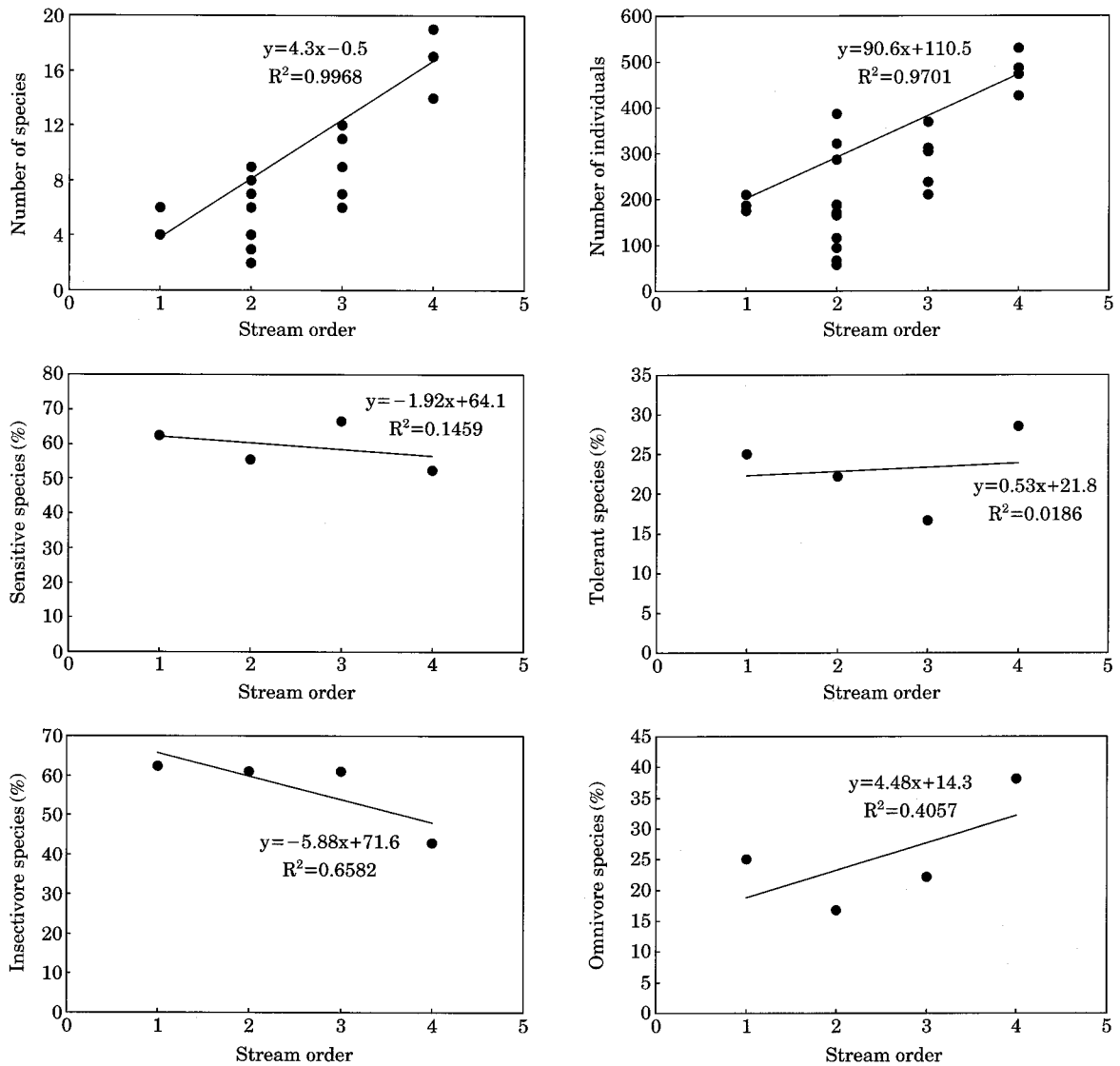


Fig. 5. Comparison between species and individuals, relative abundance of sensitive, tolerant, insectivore and omnivore species over the stream order in Heuck Stream Watershed.

높게 나타난 지류하천인 지평천(St. 13~14)은 수해복구에 따른 하천정비공사 등 서식환경에 대한 교란으로 인하여 민감종과 충식종의 비율이 낮게 나타난 것으로 사료되었다. 흑천수계의 종적 구배 특성을 살펴보면, 하류역에서 상류역으로 갈수록 내성종의 비율을 감소한 반면, 민감종의 비율은 증가하는 것으로 분석되었으며, 잡식종의 비율은 감소하는 경향이 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 흑천수계를 구성하는 각 하천들의 상류역에 있는 구간들은 하천의 자연성 및 물리적 서식환경이 하류역에 있는 구간에 비해 양호한 것으로 분석되었다.

4. 하천차수 (Stream order)에 따른 어류분포 특성 분석

Strahler(1957)의 하천차수(Stream order) 기준에 따라서 흑천수계를 구성하고 있는 각 조사 구간별 하천차수는 1~4차 하천으로, 1차 하천 3개 구간(St. 7, 15, 20), 2차 하천 12개 구간(St. 8, 9, 11, 13, 14, 17~19, 21, 23~25), 3차 하천 6개 구간(St. 5, 6, 10, 12, 16, 22), 4차 하천 4개 구간(St. 1~4)로 대별되어 주로 2~3차 하천이 주를 이루고 있는 수계이다(Table 1). 흑천수계의 본류 구간은 3~4차 하천차수로 구성되어 있으며, 지류 수계들은

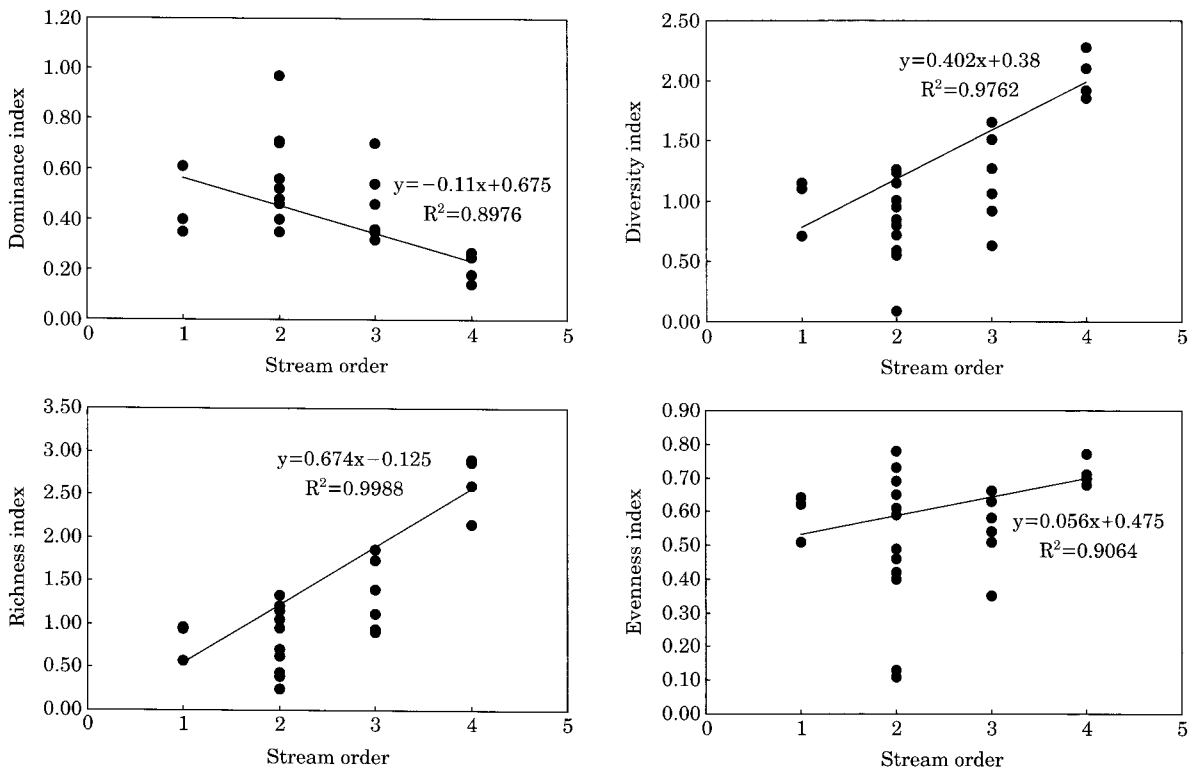


Fig. 6. Comparison between dominance index, diversity index, richness index, evenness index over the stream order in Heuck Stream Watershed.

1~3차 하천차수로 구성되어 있다. 하천차수별 흑천수계의 어류 분포 특성을 분석한 결과, 하천의 차수가 증가하면 증가할수록 출현하는 종수와 개체수가 증가하는 것으로 분석되었다. Barbour *et al.* (1999)는 점오염원 및 비점오염원의 유입 및 인위적인 서식지 교란이 적은 하천에서는 하천차수가 증가할수록 어종의 다양도 및 풍부도가 증가하는 특성을 보이는 것으로 보고된 바 있는데, 본 연구 결과에서도 이와 같은 특징을 보였다(Fig. 5). 이는 하천차수가 증가할수록 하천 유량, 어류가 서식할 수 있는 서식 공간, 먹이원이 증가하기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료되었다.

흑천수계의 본류 하천과 지류하천에 따른 출현한 종들의 분포 특성을 살펴보면, 하천차수가 낮은 지류하천들은 대부분 소규모 하천의 형태로 구간간 거리가 좁은 반면, 하천차수가 높은 본류 하천은 구간간의 거리가 멀어서 어류분포에 있어서 종 및 개체수에서 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 하천차수가 1~2차인 지류 하천들은 분포 위치상 하류역보다 상류역에 많이 분포하기 때문에 종수 및 개체수가 적은 것으로 나타났으며, 상류역에 분포한 지점일수록 민감종 비율이 높은 것으로 나타났다. 2

차 하천차수를 보이는 구간 중 분포한 위치에 따라 출현한 어류 종조성이 확연한 차이가 있는 것으로 분석되었으며, 흑천 본류의 중·하류역에 위치한 지점들의 경우 본류에 서식하는 어류들과 서식지 공유가 발생하여 상류역에 위치한 지점들에 비해 다양한 어류상이 나타난 것으로 분석되었다. 1차 하천지점들의 경우에서도 흑천수계상의 지리적 위치 및 흑천 본류와의 이격거리에 따라 출현 어류상에 차이를 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 5). 따라서 흑천수계에 분포하고 있는 어류상의 특징은 단순히 하천차수에 의한 영향보다는 본류 및 지류하천의 구간 간 이격거리 및 물리적 서식환경의 차이로 인하여 종조성에 차이를 보이는 것으로 사료되었다.

하천차수에 따른 내성종 및 트로픽 길드를 분석한 결과에서는 하천차수가 증가함에 따라 민감종 및 총식종은 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석되었으며, 내성종 및 잡식종은 하천차수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 5). Barbour *et al.* (1999)는 하천차수가 증가할수록 수생태계로 유기물 유입 증가에 따라 영양염류 및 독성물질의 유입이 증가되고, 이로 인하여 종조성의 단순화 및 내성종, 잡식종의 우

점현상이 초래되기 때문에 하천차수가 증가할수록 하천 생태계의 건강도가 악화된다는 점이 본 연구 결과와 일부 일치하는 것으로 나타났지만, 흑천수계의 경우 하천의 크기가 증가해도 서식환경의 변화 및 어류상의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 이는 이·화학적 수질변화 및 물리적 서식환경의 교란을 발생시키는 요인이 흑천수계의 대부분을 구성하는 2차 및 3차 하천들에서 비교적 적기 때문으로 사료되었다.

5. 어류 군집구조 분석

흑천수계에 대한 어류 군집구조를 분석한 결과, 군집우점도 지수는 0.18(0.14~0.97), 종 다양도 지수는 2.13(0.08~2.36), 종 풍부도 지수는 2.86(0.24~3.07), 종 균등도 지수는 0.65(0.11~0.73)로 분석되었다(Table 3). 흑천수계를 구성하는 15개 하천들에서 군집우점도 지수는 흑천 본류에서 0.14로 가장 낮게 분석되어 특정 어종의 우점화경향이 나타나지 않았고, 종 다양도 지수에 있어 2.36으로 가장 높게 분석되었으며, 종 균등도 지수에 있어서도 0.73으로 산출되어 다른 조사 하천들에 비해 어류 군집이 안정되게 유지되는 것으로 사료된다. 특히, St. 3에서는 군집우점도 지수가 0.14, 종 다양도 지수는 2.28, 종 풍부도 지수는 2.87로 분석되어 조사된 지점들 중 다양한 어류상 및 서식이 확인된 어류들이 비교적 고른 분포를 보이는 것으로 나타나 다른 구간에 비하여 안정된 군집이 유지되고 있는 것으로 나타났다. 반면, 지류하천인 갈운천과 여물천의 경우 군집우점도 지수가 0.97로 가장 높게 분석되었는데, 이는 출현종 중 버들치가 각각 98.5%, 98.2%로 우점하는 것으로 나타났으며, 종 다양도 지수에 있어 각각 0.08과 0.09, 종 균등도 지수 또한 0.11과 0.13으로 분석되어 서식종의 단순화 및 특정종의 우점화 현상으로 인하여 어류군집이 빈약하고 불안정화되어 있는 것으로 분석되었다. 전체적으로 본류 하천이 지류하천보다 종다양도 지수와 종풍부도 지수가 낮았는데 이는 하천 상류역에서 나타나는 어류군집의 일반적인 특징(변, 2008)과 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 한편, 우점도 지수가 본류 하천보다 지류하천에서 높게 나타나 본류하천이 지류하천에 비하여 서식종의 다양하고 안정된 군집구조를 이루고 있는 것으로 사료되었다.

적 요

흑천수계를 구성하는 흑천 6개의 본류 및 14개의 지류

하천을 대상으로 어류군집의 분포특성을 분석한 결과, 총 9과 26종의 서식이 확인되었으며, 이 중 Cyprinidae 어류가 15종으로 다양하게 분포하였다. 흑천수계에서 우점종은 갈겨니(29%), 피라미(22%), 버들치(21%) 등의 순으로 나타났다. 또한, 흑천 본류에서 이들 우점종의 분포특성은 최상류역은 버들치, 상류역은 갈겨니, 중-상류역은 갈겨니, 피라미, 중-하류역은 피라미에 의해 하천특성이 결정되는 것으로 나타났다. 서식이 확인된 어류 중 한국고유종은 한강납줄개 등 7과 13종(50%)로 고유종의 구성비가 높게 나타나 한반도 평균적인 고유종 빈도인 23%에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 하천차수별 어류의 분포특성은 하천차수가 증가할수록 종수 및 개체수가 증가하는 것으로 경향을 보였는데 이는 하천크기의 영향보다는 지점 간의 이격거리 및 지류하천의 지리적 위치에 따른 차이가 어류 분포에 있어서 더 많은 영향을 주는 것으로 사료되었다. 또한, 내성도 및 트로픽 길드를 분석한 결과에서는 하천차수가 증가함에 따라 민감종 및 충식종은 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석되었으며, 내성종 및 잠식종은 하천차수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 특히, 민감종 및 충식종 비율이 50% 이상 되는 구간들이 많은 것으로 분석되어 흑천수계가 하천의 자연성 및 서식환경의 보존가치가 높은 수계로 사료된다.

인 용 문 헌

- 국토해양부. 2000. 한국하천일람. 명신인쇄, 서울. p. 17-95.
- 권영수, 안광국. 2006. 금호강 수계에서 생물학적 하천 건강도 및 이화학적 특성. 한국육수학회지 39(2): 145-156.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감 제37권 동물편(담수어류). 교육부. p. 133-520.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사, 서울. pp. 465.
- 남영모. 1996. 한국산 담수어류의 현황. '96 한국육수학회 심포지움. p. 31-45.
- 노세윤. 2009. 민물고기 쉽게 찾기. 진선출판사.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 감천생태계 평가. 한국육수학회지 39(2): 198-208.
- 변화근. 2008. 국망산 일대의 어류상. 한국자연보존연구지 6: 57-64.
- 손영목, 송호복. 2006. 금강의 민물고기. 지성사.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지 38(3): 361-371.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001b. 생물보전지수(Index of Biologi-

- cal Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계의 평가. *환경생물* **19**(4): 261-269.
- 안광국, 이재연, 배대열, 김자현, 황순진, 원두희, 이재관, 김창수. 2006. 우리나라 주요하천 수계에서 다변수모델을 이용한 생태학적 수환경 평가. *한국물환경학회지* **22**(5): 796-804.
- 안광국, 이재연, 장하나. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강성 평가 및 수질양상. *한국육수학회지* **38**(3): 341-351.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001a. 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 및 서식지 평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. *한국육수학회지* **34**(3): 153-165.
- 양현, 김현수. 2005. 제2차 전국자연환경조사(담수어류). 환경부. pp. 1198-182.
- 염동혁, 안광국, 홍영표, 이성규. 2000. 어류군집을 이용한 금호강의 생물보전지수(Index of Biological Integrity, IBI) 평가. *환경생물* **18**: 215-226.
- 이완옥, 노세윤. 2006. 특징으로 보는 한반도 민물고기. 지성사, 서울. p. 432.
- 이재훈, 홍영표, 안광국. 2007. 남한강 상류 수계에서 어류의 다변수 모델 지수 산정 및 군집지수와 비교평가. *한국육수학회지* **40**(2): 327-336.
- 전상린. 1980. 한국산담수어의 분포에 관하여. 중앙대학교 박사학위논문. p. 14-49.
- 정문기. 1977. 한국어도보. 일지사, 서울. p. 727.
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 1984. 한국담수어류분포도. 정문사, 서울. p. 234.
- 최기철. 1986. 경기의 자연(담수어편). 경기도교육위원회. p. 204-207.
- 최기철. 2001. 쉽게 찾는 내 고향 민물고기. 현암사, 서울. p. 24-287.
- 홍영표. 1991. 한강수계에 서식하는 피라미와 갈거니의 분포 및 군집동태에 관한 연구. 충남대학교 대학원 박사학위 청구논문. pp. 34-81.
- 환경부. 2007. 수생태 건강성 회복을 위한 하천복원 모델과 기준, 조사계획 수립 연구 최종보고서(II). 수생태 건강성 조사계획 수립 및 지침. p. 65.
- 환경부/국립환경연구원. 2004. 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(I). 최종보고서.
- 환경부/국립환경연구원. 2005. 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(II). 최종보고서.
- 환경부/국립환경연구원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(III). 최종보고서.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, 2nd Ed, EPA 841-B-99-002. US EPA Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Garcia, S.M. and K.L. Cochrane. 2005. Ecosystem approach to fisheries: a review of implementation guidelines. *ICES Journal of Marine Science* **62**: 311-318.
- Jones, J.P.G., F.B. Andriahajaina, and N.J. Hockley. 2005. A multidisciplinary approach to assessing the sustainability of freshwater crayfish harvesting in Madagascar. *Conservation Biology* **19**: 1863-1871.
- Judy, R.D. Jr, P.N. Seeley, T.M. Murray, S.C. Svirsky, M.R. Whitworth and L.S. Ischinger. 1984. National Fisheries Survey. Vol. 1. Technical report: initial findings. United States Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/06.
- Karr, J.R., K.D. Fausch, P.L. Angermeier, P.R. Yant and I.J. Schlosser. 1986. Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28, Illinois National History Survey, Special Publication 5, Champaign, IL.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *Generation System* **3**: 36-71.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world. John Wiley & Sons, New York. p. 600.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. Wiley. New York. p. 165.
- Pikitch, E.K., C. Santora and E.A. Babcock. 2004. Ecosystem-based fishery management. *Science* **305**: 346-347.
- Rutherford, D.A., A.A. Echelle and O.E. Maughan. 1987. Changes in the fauna of the little river drainage, south eastern Oklahoma, 1948~1955 to 1981~1982: Test of the Hypothesis of environmental degradation. Community and evolutionary ecology of north American stream fishes. University of Oklahoma. p. 178-183.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 688.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions* **38**: 913-920.
- US. EPA. 1991. Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-001. US EPA, Office of Water, Washington D.C., USA.

(Manuscript received 8 February 2010,
Revision accepted 11 March 2010)