

금강하류의 어류상 및 안정동위원소 분석을 이용한 섭식길드 파악

윤주덕 · 박상현⁵ · 장광현¹ · 최종윤² · 주기재²
남귀숙³ · 윤조희⁴ · 장민호^{5,*}

공주대학교 생물자원센터, ¹경희대학교 환경학 및 환경공학과
²부산대학교 생명과학과, ³한국농어촌공사 농어촌연구원
⁴국립환경과학원 금강물환경연구소, ⁵공주대학교 생물교육과

Characteristics of Fish Fauna in the Lower Geum River and Identification of Trophic Guilds using Stable Isotopes Analysis

Ju-Duk Yoon, Sang-Hyeon Park⁵, Kwang-Hyeon Chang¹, Jong-Yun Choi²,
Gea-Jae Joo², Gui-Sook Nam³, Johee Yoon⁴ and Min-Ho Jang^{5,*}

Biological Resource Center, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

¹Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University,
Yongin 446-701, Korea

²Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 462-908, Korea

⁴Geum-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research,
Okcheon 373-804, Korea

⁵Department of Biology Education, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

Abstract - Fish fauna, difference of stable isotope ratio between freshwater and seawater, and trophic guilds of freshwater fishes were investigated in the lower Geum River. The study was conducted in 2011, and total study area was about 30 km of 20 km upstream and 10 km downstream from the Geum River estuary barrage. Only freshwater fishes were used for analyzing trophic guilds, and discriminant function analysis (DFA) was utilized to reclassify trophic guilds based on stable isotope ratio. Fish fauna in freshwater and seawater areas were entirely different each other, but small number of migratory species such as *Coilia nasus* and *Chelon haematocheilus* occurred both areas. Other species were not collected in the different areas because they did not have physiological ability to adapt different salinity concentrations. Stable isotope ration of two areas were different considerably due to food sources. Estuary and seawater fishes uptake food sources originated from marine, and freshwater fishes were from freshwater and terrestrial. Some migratory species showed reverse stable isotope ratio. Even though they collected in freshwater, they showed stable isotope ratio of seawater. This is because ecological characteristics of each species. Trophic guilds of freshwater fishes were reclassified by DFA, and showed slight difference with literatures.

* Corresponding author: Min-Ho Jang, Tel. 041-850-8285,
Fax. 041-850-8842, E-mail. jangmino@kongju.ac.kr

However, because this result is related with ontogenetic shift of species, more studies are needed to explain exact and correct trophic guilds. Stable isotope ratio can be changed among regions, seasons and ontogenetic stage, thus we always consider these aspects when analyzing results to get a right answer.

Key words : stable isotope, food web, fish fauna, Lower Geum River

서 론

댐이나 보, 하구둑과 같은 하천내 거대 구조물의 건설은 하천의 물리적인 구조를 변화시킴으로써 물의 흐름을 변화시키고 수류의 변화는 점진적으로 인근 지역의 수환경의 변화를 초래한다 (Martinez *et al.* 1994; Gehrke *et al.* 2002; Habit *et al.* 2007). 또한 변화된 환경은 기존의 물질 순환 패턴에 영향을 주어 장, 단기적으로 수생생물을 변화시키고 어류와 저서생물, 플랑크톤의 종 조성변화를 유발하면서 수생태계의 구조를 변화시킨다. 특히 수생태계 내에서 최상위포식자의 역할을 하고 있으며, 수생태계를 대표하는 어류의 경우 변화된 환경에 의해 분포나 서식이 직접적으로 영향을 받기도 하지만, 변화된 수생생물에 의해 먹이원의 변화와 같은 간접적인 영향도 받는다.

안정동위원소는 먹이망구조를 밝히는 데 상당히 유용한 분석 방법으로, 분석에 사용되는 많은 원소들 중 생태학적 연구를 진행하는 데 있어서 가장 일반적으로 사용되는 원소는 탄소($\delta^{13}\text{C}$)와 질소($\delta^{15}\text{N}$)이다. 탄소의 경우 먹이에서 소비자로 이어지는 구조에서 수치의 변화가 적기 때문에 (0~1‰; McCutchan *et al.* 2003), 먹이원을 파악하는 데 주로 사용된다. 반면 질소의 경우는 섭식 단계에 따라 약 3‰ 정도 차이가 존재하기 때문에 (McCutchan *et al.* 2003) 일반적으로 영양단계를 결정하는 데 주로 활용된다 (Post 2002). 이처럼 안정동위원소는 먹이원과 영양단계에 대한 정보를 제공해 주기 때문에 먹이사슬 내 영양단계 (trophic level)를 밝혀거나, 생태적지위의 중첩 (niche overlap), 섭식길드, 먹이망 구조를 밝히는 데 유용하다 (Abrantes and Sheaves 2009; Burrell *et al.* 2012).

금강 하구둑은 1990년도에 완공된 구조물로서 금강 하류부분의 군산과 장항사이에 건설되어 있다. 하구둑 건설과 더불어 하구둑에서 약 35 km 상류까지 미쳤던 해수의 영향 (Cho *et al.* 1978)이 완전히 사라졌으며 이후, 하구둑을 기준으로 상류는 담수역, 하류는 기수 및 해수역이 조성되었다. 이후 급격한 생물상의 변화가 발생하였으며, 특히 기존 하류역을 구성하던 어류상은 다른 종

들로 급속한 대체가 일어났다. 하지만 과거 어류 군집 조사를 위해 시행된 일부 연구 (e.g. Hwang *et al.* 1992; Lee 1992)만 있을 뿐 금강 하류의 먹이망 구조에 대한 연구는 현재까지 시행되지 않았다. 따라서 금강 하류역의 관리나 복원 등을 위한 전반적인 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 금강의 먹이망 연구를 위한 기초작업으로 금강 하류에서 출현한 어류만을 대상으로 i) 금강 하구둑과 어류상과의 관계와 ii) 담수역과 해수역에 출현하는 어류의 안정동위원소 수치 차이, 그리고 iii) 현재 먹이원 분석을 통해 알려진 담수어류의 섭식길드가 금강의 담수어류에 대해서도 적절하게 적용이 가능한지 안정동위원소를 통해 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황 및 어류 채집

총 유로 연장 397 km, 유역면적 9912 km²에 이르는 금강은 한강과 낙동강에 이어 국내에서 3번째로 큰 하천으로 전라북도 장수군 장수읍 수분리의 신무산 동쪽 계곡에서 발원하여 서천군과 군산시 사이의 하구를 통해 서해로 유입된다. 상류에는 식수 공급을 위해 용담댐과 대청댐이 건설되어 있으며, 하구에는 염분 침투를 방지하기 위한 금강하구둑 (길이 약 1.8 km)이 설치되어 있다. 최근에는 4대강 사업으로 인해 건설된 3개의 보 (세종보, 공주보, 백제보)가 건설되어 전반적인 하천의 흐름을 조절하고 있다. 본 연구 대상지역은 금강의 하류지역으로 금강 하구둑을 기준으로 상류로 약 20 km, 하류로 약 10 km 구간에서 연구가 진행되었다. 담수역의 조사지점은 총 3지점으로 지점들간에는 하천수로를 따라 약 10 km 정도의 차이를 두고 선정하였고, 해수지역은 하구둑의 구 수로를 따라 완전히 바다와 만나기 이전의 1지점을 연구지점으로 선정하였다 (Fig. 1). 담수역 지점들은 유로폭이 500 m 이상인 지역들로서 수변부 일부를 제외하고 대부분 지역들의 하상은 모래와 펄로 구성되어 있었으며, 하구둑으로 갈수록 펄의 비율이 높아졌다. 담수

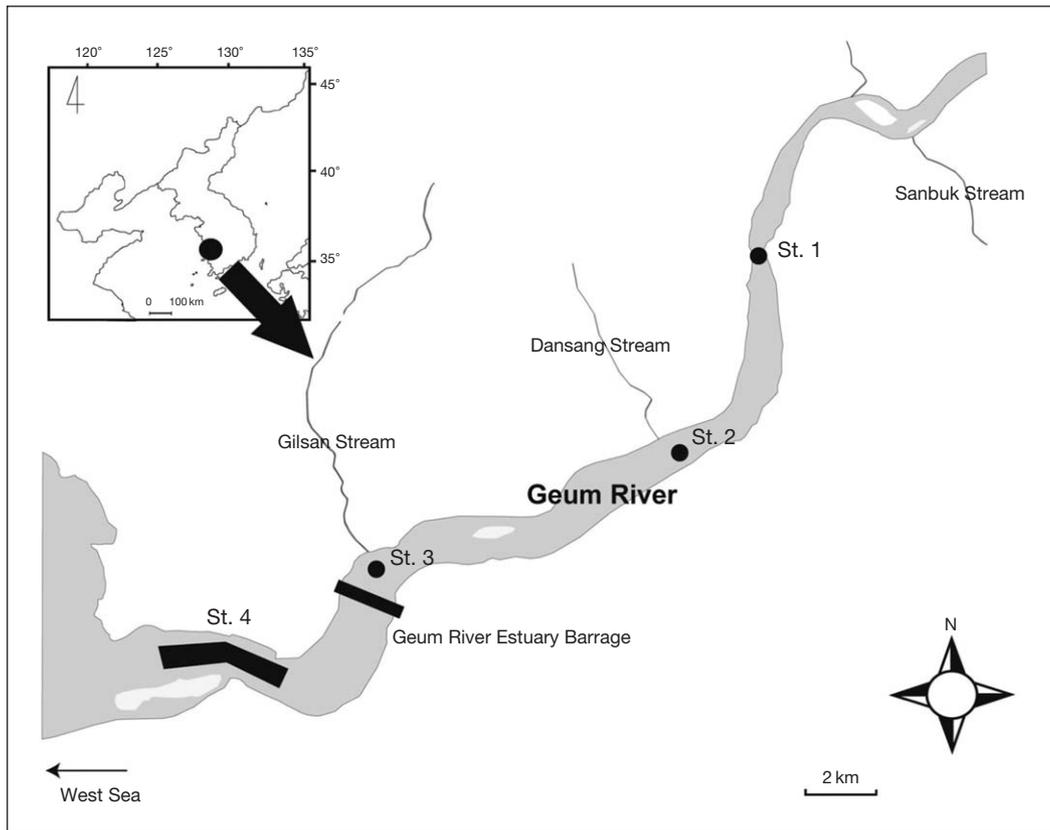


Fig. 1. Map of study site. St. 1 to St. 3 and St. 4 were freshwater and seawater, respectively.

역 대부분 지역들은 수심이 4 m 내외였으나 하구둑의 방류정도에 따라 1 m 가량의 수심이 변동되었다. 금강 하구둑 수문 운영은 간조시 수문을 열어 담수를 내려보내고 해수면이 강의 수면보다 높아지는 만조시기에 수문을 닫아 염분이 담수로의 침투를 방지하는 방식이었다. 이에 따라 해수측은(하구둑 하방은) 만조시 유입되는 해수로 인해 수위가 높아지고 염분농도가 높아지며 간조시 수위가 낮아지고 하구둑 방류로 인해 염분농도가 낮아지는 패턴을 보였다(Yang and Kim 1990).

어류의 채집은 겨울철을 제외하고 2011년 5월과 7월, 11월 총 3회 실시되었으며, 담수역의 경우 삼중자망을 설치하였기 때문에 모든 조사는 1박 2일 동안 진행되었다. 담수역과 해수역으로 나누어지는 연구 지점의 특성을 고려하여 각 지점별로 다른 채집방법을 적용하였다. 담수지역인 하구둑 상류 3지점의 경우 투망(망목 7×7 mm), 족대(망목 5×5 mm), 두 가지 크기의 삼중자망(망목 40×40 mm, 길이 50 m, 높이 150 cm; 망목 12×12 mm, 길이 50 m, 높이 85 cm)을 이용하여 어류의 채집이 이루어졌다. 투망은 각 지점에서 10회 투척하였으며, 족

대는 적용이 가능한 지점에서 30분 시행하였다. 자망의 설치는 기본적으로 12시간을 기준으로 하였고 저녁시간과 새벽시간을 포함하도록 하여 해가 지기 이전에 설치하고 새벽에 회수하여 확인하였다.

해수역 지역의 특성이 강한 하구둑 하류는 저인망을 이용하여 어류의 채집을 시행하였다. 채집에 사용된 저인망은 그물 전체길이 20 m, 망폭이 8 m, 날개그물의 망목 3.5 cm, 자루그물의 망목은 1.5 cm인 새우조망을 이용하였다. 전체 약 2 km 구간을 대상으로 수심 5~8 m에서 선속 2~3 knots로 30분간 인양이 이루어졌다. 금강 하구둑의 경우 조수에 따라서 수위가 상당히 차이가 나기 때문에 모든 조사는 항상 물이 차 있는 시기인 만조때 시행하였다.

채집된 어류는 안정동위원소 측정을 위한 개체들을 제외하고 현장에서 동정 및 개수 후 방류하였으며, 동정이 모호한 종의 경우 10% formalin 용액에 고정한 뒤 실험실로 이동하여 동정, 분류하였다. 어류는 Kim and Park (2002)을 이용하여 동정하였으며, Nelson (1994)의 분류 체계를 따랐다.

2. 안정동위원소 분석

안정동위원소 측정을 위한 시료는 5월 현장 조사시 채집된 어류를 대상으로 하였고 기본적으로 종 당 3개 채씩 분석에 사용하였다. 개체수가 충분하지 않더라도 중요한 종으로 판단되는 종들은 추가적으로 분석에 포함시켰다. 현장에서 채집된 개체에서 1~2 g의 순수한 근육을 채취하여 분석을 시행하였다. 분리된 시료는 60 °C에서 최소 48시간 건조 후 분말처리한 후, methanol과 chloroform 혼합액 (2:1)을 이용하여 지방 성분을 제거한 후 탄소 안정동위원소비를 측정하였고, 질소 안정동위원소비의 경우 처리를 하지 않은 시료를 이용하여 측정하였다. 전처리 된 시료는 안정동위원소 질량분석기 (CF-IRMS Micromass isoprime, 부산대학교 공동실험실습관)를 이용하여 탄소와 질소 안정동위원소 비를 측정하였다. 시료의 동위원소비 값은 표준물질에 대한 시료의 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내었다.

$$\delta C(N)\text{‰} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

$$[R : \delta C = C^{13}/C^{12}, \delta N = N^{15}/N^{14}]$$

3. 데이터 분석

금강 하류에서 채집된 개체들은 대상으로 구해진 탄소와 질소의 안정동위원소 수치를 이용하여 본 조사시 채집된 어류의 섭식길드(trophic guild)를 확인하였다. 분석 및 비교는 담수종들만을 대상으로 진행하였으며, 판별분석(discriminate function analysis)을 이용하여 기존에 Kim and Park (2002), 국립환경과학원의 수생태계 건강성 평가에 제시되어 있는 어류의 섭식길드와 본 연구에서 산출된 안정동위원소 수치와 비교를 진행하였다. 현재 국내의 담수종을 대상으로 섭식길드의 구분은 총 4가지로 육식성(carnivore), 충식성(insectivore), 잡식성(omnivore), 초식성(herbivore)이지만 본 연구 진행시 초식종은 채집되지 않았기 때문에 이를 제외한 3가지 섭식군을 대상으로 분석을 시행하였다. 자료의 분석은 SPSS 18.0 (IBM Corporation, USA)을 이용하여 이루어졌다.

결 과

1. 어류상

전체조사기간동안 출현한 어류는 총 15과 44종 1,486

개체였다(Table 1). 하구둑 아래 해수부에서 출현한 종과 개체가 21종 1,030개체로 전체 출현종의 69.3%를 나타내 담수측에서 채집된 어류에 비해 높은 비율을 나타냈다. 전체 출현종 중 우점종은 멸치(*Engraulis japonicas*, RA(상대풍부도): 29.74%)로 하구둑 아래 해수측 조사지점에서만 채집되었으며, 아우점종 또한 해수지역에서만 채집된 주둥치(*Leiognathus nuchalis*, RA: 12.92%)와 덕대(*Pampus echinogaster*, RA: 12.79%)였다. 이들 종들은 총 3회의 조사시기 중 각각 한 번씩의 시기(멸치, 주둥치: 3차조사; 덕대: 2차조사)에만 채집되었지만, 개체군을 형성해 함께 이동하는 특성 때문에 한번에 많은 개체들이 포획된 것으로 판단된다. 해수역에서 채집된 어종 중 담수어류는 1종 1개체로 뿔경모치(*Microphysogobio jeoni*)가 1차 조사시 채집되었다. 뿔경모치를 제외하고 해수측 조사에서 채집된 담수어류는 없었다. 이에 비해 담수어류는 26종 456개체가 채집되어 30.7%의 비율을 나타냈고 대부분이 하구둑 상류부의 담수지역에서 출현하였다. 담수어류 중 가장 많이 채집된 어류는 누치(*Hemibarbus labeo*)로 전체조사지역을 기준으로한 RA는 7.27%였지만 담수조사지역만을 대상으로 하였을시에는 23.68%의 RA를 나타내 담수지역 우점종으로 확인되었다. 담수지역의 아우점종은 밀자개(*Leocassis nitidus*, RA: 5.99%)로 담수지역 기준 RA는 19.51%였다. 담수지역에서 우점과 아우점하고 있는 종들은 모두 하구둑 바로 위쪽은 St. 3 지역에서 다수가 채집되었으며, 전반적으로 St. 3에서 다른 지역에 비해 많은 종과 개체가 출현하였다. 담수지역과 해수지점에서 모두 채집된 회유성 어류는 송어(*Mugil cephalus*)와 가송어(*Chelon haematocheilus*), 웅어(*Coilia nasus*) 총 3종이 출현하였다. 양측회유성 어종인 송어와 가송어는 하구둑 바로 위쪽 지점인 St. 3에서만 확인되었고, 산란을 위해 강으로 이동하는 소하성 어류인 웅어는 St. 1번 지점에서도 확인되어, 최소한 20 km 이상 담수지역으로 이동하는 것으로 확인되었다.

2. 조사지점별 출현 어류의 안정동위원소 비교 및 출현 담수어류의 섭식길드

담수지역과 기수 및 해수 지역에서 채집된 종들의 안정동위원소 비율은 확실한 차이를 보였다(Fig. 2). 담수역과 해수지역에서 모두 출현한 웅어와 해수지역에서 1개체가 채집된 뿔경모치를 제외하고 나면 담수지역의 경우 가장 낮은 $\delta^{13}C$ 값은 St. 1에서 채집된 눈불개(*Squaliobarbus curriculus*)의 -20.8‰ 였고, 해수지역에서는 개소갱(*Odontamblyopus rubicundus*)이 -18.9‰ 로 가장

Table 1. Fish fauna of study sites in the lower Geum River. St. 1 to St. 3 and St. 4 were freshwater and seawater, respectively. RA is relative abundance of collected species.

Family	Species	Freshwater			Seawater	Total	RA (%)
		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4		
Engraulidae	<i>Coilia nasus</i>	1	5	11	2	19	1.28
	<i>Engraulis japonicus</i>				442	442	29.74
	<i>Thryssa adelae</i>				14	14	0.94
Clupeidae	<i>Konosirus punctatus</i>				44	44	2.96
	<i>Sardinella zunasi</i>				2	2	0.13
Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i>	1	6	3		10	0.67
	<i>Carassius auratus</i>	2		11		13	0.87
	▲ <i>Carassius cuvieri</i>	2		15		17	1.14
	<i>Acheilognathus lanceolatus</i>			1		1	0.07
	<i>Acheilognathus rhombeus</i>		1			1	0.07
	<i>Acheilognathus macropterus</i>	5	3	2		10	0.67
	<i>Acheilognathus gracilis</i>		1	1		2	0.13
	<i>Pseudorasbora parva</i>			2		2	0.13
	※ <i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	2				2	0.13
	※ <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>		4			4	0.27
	※ <i>Squalidus japonicus coreanus</i>			6		6	0.40
	<i>Hemibarbus labeo</i>	14	34	60		108	7.27
	<i>Pseudogobio esocinus</i>	1				1	0.07
	※ <i>Microphysogobio jeoni</i>	1		14	1	16	1.08
	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	2				2	0.13
	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	19	20	6		45	3.03
	<i>Erythroculter erythropterus</i>	1	8	39		48	3.23
<i>Hemiculter leucisculus</i>	30	1	4		35	2.36	
Bagridae	<i>Leiocassis nitidus</i>	4	12	73		89	5.99
Mugilidae	<i>Mugil cephalus</i>			3		3	0.20
	<i>Chelon haematocheilus</i>			3	25	28	1.88
Platycephalidae	<i>Platycephalus indicus</i>				17	17	1.14
Leiognathidae	<i>Leiognathus nuchalis</i>				192	192	12.92
Sciaenidae	<i>Collichthys lucidus</i>				16	16	1.08
	<i>Pseudosciaena crocea</i>				9	9	0.61
	<i>Pseudosciaena polyactis</i>				20	20	1.35
Centropomidae	<i>Siniperca scherzeri</i>		1			1	0.07
Centrarchidae	▲ <i>Micropterus salmoides</i>	3	5	1		9	0.61
Pholididae	<i>Pholis nebulosa</i>				2	2	0.13
Gobiidae	<i>Synechogobius hasta</i>				26	26	1.75
	<i>Rhinogobius brunneus</i>		1			1	0.07
	<i>Tridentiger obscurus</i>				2	2	0.13
	<i>Tridentiger brevispinis</i>		11			11	0.74
	<i>Ctenotrypauchen microcephalus</i>				2	2	0.13
	<i>Odontamblyopus rubicundus</i>				5	5	0.34
	<i>Scomberomorus niphonius</i>				1	1	0.07
Stromateidae	<i>Pampus echinogaster</i>				190	190	12.79
Cynoglossidae	<i>Cynoglossus semilaevis</i>				3	3	0.20
	<i>Cynoglossus joyneri</i>				15	15	1.01
	No. of individuals	88	113	255	1,030	1,486	
	No. of species	15	15	18	21	44	

▲: exotic species; ※: endemic species

낮은 값을 보였다. 이외의 종들은 대부분 -17‰ 이상의 수치를 나타냈다. 담수지역에서 출현한 개체들의 안정동위원소 값은 지점별로 차이를 보이지 않았다. 담수지역 개체들 중 가장 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 기록한 종은 St. 2에서

채집된 눈볼개로 -27.3‰ 이었다. 잡식종인 눈볼개는 상당히 넓은 탄소 값을 보였다. $\delta^{15}\text{N}$ 은 St. 1에서 채집된 치리(*Hemiculter eigenmanni*)가 11.2‰ 로 가장 낮은 수치를 보였고, 가장 높은 수치는 St. 2에서 채집된 배스(*Micro-*

pterus salmoides)의 21.2‰이었다. 담수지역에서 채집된 잉어는 안정동위원소 값이 해수지점에서 출현한 종들과 유사하게 나타났고, 반대로 해수지점에서 채집된 잉어는 담수종들과 유사한 수치를 보였다. 해수지역에서 채집된 뽕명모치의 경우 담수지역의 수치와 유사하였다.

금강 하류 담수지역에서 출현한 16종의 담수어류를 대상으로 하여 섭식길드별로 C와 N의 안정동위원소 값을 구한 결과는 Table 2, Fig. 3과 같다. 대부분의 섭식길

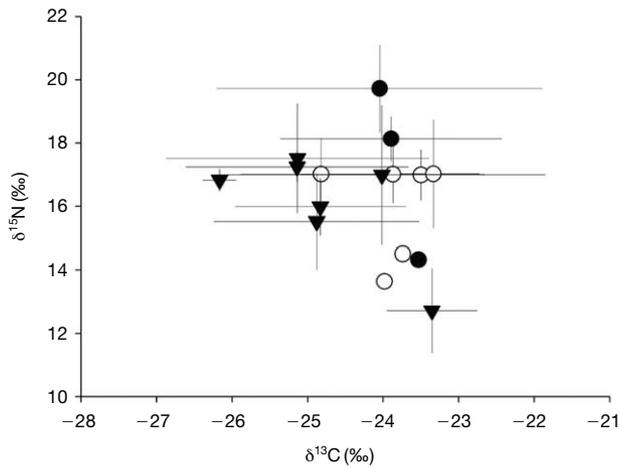


Fig. 2. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of individuals fishes from whole study sites. St. 1 (Solid circle, the most upstream site), St. 2 (open circle), St. 3 (reverse solid triangle), St. 4 (open triangle, estuary and marine site). *Con*, *Odl* and *Mij* indicate *Coilia nasus*, *Odontamblyopus rubicundus* and *Microphysogobio jeoni*, respectively.

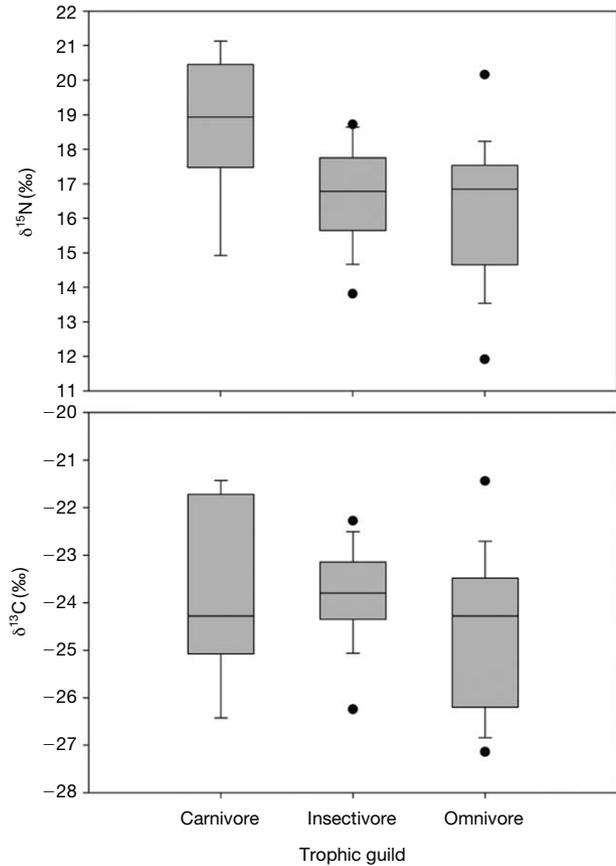


Fig. 3. Stable isotope bi-plot (mean \pm SD) showing the trophic relationships of carnivore (solid circle), insectivore (open circle), and omnivore (reverse solid triangle) in the lower Geum River. Only freshwater fishes were used for analysis.

Table 2. Stable isotope ratios (mean \pm SD) of fish in the Geum River. Only freshwater fishes are considered, and a classification of trophic guilds is based on Kim and Park (2002)

Taxa	n	TL (mm)	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Carnivore				
<i>Erothrocultus erythropterus</i>	4	318 ~ 438	-23.9 ± 1.5	18.1 ± 0.7
<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	1	89	-23.5	14.3
<i>Micropterus salmoides</i>	6	298 ~ 384	-24 ± 2.2	19.7 ± 1.4
Insectivore				
<i>Hemibarbus labeo</i>	9	265 ~ 365	-23.5 ± 0.9	17 ± 0.8
<i>Microphysogobio jeoni</i>	5	30 ~ 104	-23.3 ± 0.6	17 ± 1.7
<i>Pseudogobio esocinus</i>	1	35	-23.7	14.5
<i>Tridentiger brevispinis</i>	1	44	-24	13.6
<i>Leiocassis nitidus</i>	5	123 ~ 180	-24.8 ± 1.1	17 ± 1.1
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	2	93 ~ 149	-23.9 ± 1.2	17 ± 0.9
Omnivore				
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	8	144 ~ 445	-24 ± 2.2	17 ± 2.2
<i>Squalidus gracilis japonicus</i>	3	71 ~ 72	-25.1 ± 1.5	17.2 ± 0.5
<i>Carassius auratus</i>	3	187 ~ 292	-24.9 ± 1.4	15.5 ± 1.5
<i>Cyprinus carpio</i>	3	434 ~ 635	-25.1 ± 1.7	17.5 ± 1.7
<i>Pseudorasbora parva</i>	2	72 ~ 78	-26.2 ± 0.2	16.8 ± 0.4
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	3	152 ~ 200	-23.4 ± 0.6	12.7 ± 1.3
<i>Acheilognathus macropterus</i>	4	79 ~ 126	-24.8 ± 1.1	16 ± 0.9

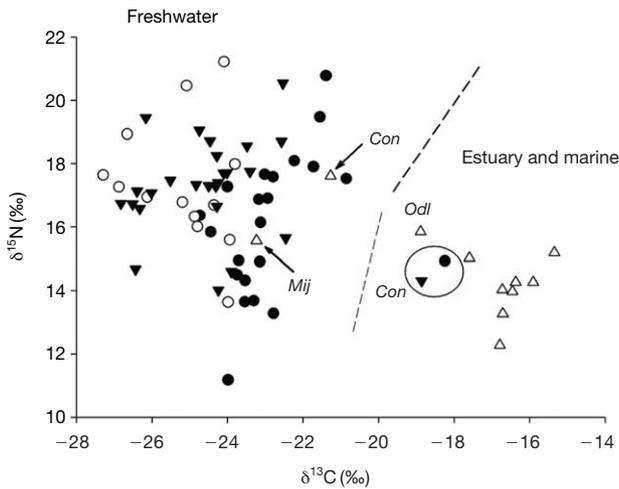


Fig. 4. The isotopic relationship between trophic guild and stable isotope value for freshwater fishes in the lower Geum River. Solid circle means 5th and 95 the percentile.

Table 3. Reclassification of trophic guild membership of fishes in the lower Geum River using discriminate function analysis. Guild membership is based on literature, and predicted guild membership is based on stable isotope ratios ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$)

Trophic guild	Predicted guild membership (%)		
	Carnivore	Insectivore	Omnivore
Carnivore	66.7	33.3	0
Insectivore	0	66.7	33.3
Omnivore	0	28.6	71.4

드가 상당히 겹치는 것으로 확인되었다. 육식성 어류의 경우 $\delta^{15}N$ 수치가 다른 충식성이나 잡식성에 비해 높았고 충식성과 잡식성은 유사한 것으로 나타났다 (Fig. 4). 육식성 길드에 포함되는 한종의 경우 (끄리) $\delta^{15}N$ 수치가 상당히 낮게 나타났는데 분석 개체수가 1개체로 작고 또한 분석에 사용된 개체의 크기가 성체가 아닌 작은 89 mm (전장)의 개체였다. $\delta^{13}C$ 의 경우 범위가 넓고 섭식길드별로 상당히 겹치고 있었다. 모든 섭식길드의 범위가 겹치고 있어서 섭식길드를 뚜렷이 구분하는 데 적절하지 않은 것으로 판단되었다 (Fig. 4).

판별분석의 결과에 의하면 기존의 섭식길드와 일부 차이가 있는 것으로 나타났다 (Table 3). 육식종과 충식종은 각각 66.7%가 정확하게 분류되었고 잡식종은 71.4%가 정확하게 분류되었다. 육식종은 33.3%가 충식성으로 재분류되었고, 충식종은 동일한 비율이 잡식성으로 분류되었다. 또한 잡식종은 28.6%가 충식성으로 재분류되었다. 일반적으로 잡식종의 경우 먹이원이 다양하기 때문

에 분류의 정확도가 낮을 것이라 예상하였지만 오히려 다른 섭식길드에 비해서 정확도가 높게 나타났다.

고찰

1. 금강 하류역의 어류상

하구둑을 기준으로 해수의 영향을 받는 하구둑 하류 지점과 담수의 영향을 받는 하구둑 상부 지역의 어류상은 완전히 다르게 나타났다. 하구둑 건설이전 넓게 형성되어 있던 기수역이 줄어들고 그 지역을 담수가 대체하였고, 하구둑 하류 부분에서 서해와 만나기 이전 부분까지 일부 기수역이 형성되었다. 따라서 염분농도 변화에 대응할 수 있는 생리적인 기작이 없는 기수 및 해양성 어류는 조석차이로 인해 물이 들어오는 시기에만 일시적으로 하구둑 아래에까지 이동하여 오고 물이 빠져나가는 시간대에는 물때에 맞춰서 서해쪽으로 빠져나가는 것으로 판단된다. 이와 마찬가지로 담수종은 뿔경모치와 같이 의도치 않게 하구둑 하류로 내려가는 경우를 제외하고 모두 하구둑 위쪽에 머무르는 것을 확인되었다. 뿔경모치와 같은 경우는 금강 수위조절을 위한 하구둑 수문 조작시 빠른 물살에 쓸려서 내려간 것으로 판단되고 있다.

담수지역 조사지점들 사이에는 출현종에 큰 차이가 없었다. 일부종의 출현 개체수에 차이가 있기는 하였지만 전반적인 출현 패턴은 유사하였다. 하구둑 상류부는 거대한 저수지와 같은 형태를 띠고 있다. 물이 수문으로 가뒀어져 있기 때문에 홍수기를 제외하고 물의 흐름이 거의 없는 상태이다. 이런 환경은 하구둑에서 20 km 상류에 위치한 St. 1도 마찬가지로 St. 3에 비하면 유속이 어느 정도 존재하지만 거의 동일한 정수역 형태였다. 따라서 이와 같은 환경적인 유사성이 상당한 거리의 차이에도 불구하고 어류상의 유사하게 만든 것으로 판단된다.

회유성 어류의 경우 넓은 염분 범위에 견딜수 있는 생리적인 구조가 갖춰져 있기 때문에 (Lucas and Baras 2001) 담수와 해수를 왕래할 수 있다. 본 연구에서는 양측회유성 어종인 송어와 가숭어, 소하성 어종인 웅어가 담수지역에서 출현하였는데 담수에 적응할 수 있는 생리적 특성이 반영된 결과로 판단된다. 금강하류역에서 acoustic telemetry 방식을 이용해 송어와 가숭어의 이동을 연구한 자료 (Yoon unpublished data)에 의하면 발신기가 부착된 일부 개체의 경우 웅포대교까지 이동하는 것이 확인되었다. 또한 하구둑에서 약 60 km 정도 떨어진

저 있는 백제보 하류에서도 자주 출현하는 것으로 보아 모든 개체는 아니지만 일부 개체의 경우 상당히 상류까지 이동하는 것으로 판단된다. 웅어도 모든 조사지점에서 출현하여 중류 이상까지 회유 하는 것으로 판되었다. 하지만 전반적으로 출현하는 개체수는 적은 것으로 판단되었다.

하구독으로 인한 단절이 물리적으로 심각한 교란을 발생시키면서 기존의 환경이 변화되었고 결과적으로 생물종의 변화 및 재배치 이동을 유발하였다. 과거부터 뱀장어 (*Anguilla japonica*)와 황복 (*Takifugu ocellatus*), 웅어, 은어 (*Plecoglossus altivelis*), 도화뱀어 (*Neosalanx andersoni*), 가승어와 같은 다양한 회유성 어류들이 산란과 성장을 위해 금강으로 회유해 왔지만 현재는 개체수가 급감했을 뿐만 아니라 황복이나 은어, 도화뱀어와 같은 종들은 몇 년전부터 금강에서 출현이 확인되지 않고 있다. 물론 수질오염이나 서식처 변화와 같은 요인들도 전반적인 환경에 영향을 주고 있지만 이런 일련의 변화들이 결과적으로 하구독의 건설로 인해 유발되었기 때문에 대책이 필요하다. 현재 3개의 하천에 건설되어 있는 하구독에 어도를 설치하여 어류의 이동을 돕고 있지만 회유성 어류의 소상을 늘리기 위해서는 어도의 개수를 늘리거나 현재의 어도를 개선하는 것과 같은 방안 마련이 필요하다.

2. 안정동위원소 분석

어류상 결과와 마찬가지로 안정동위원소 분석을 통한 분석에서도 하구독 상류와 하류는 완전히 구분되어 있었다. 일반적으로 먹이 기원에 차이가 있기 때문에 담수와 기수, 해수역의 어류에서는 안정동위원소의 수치에 차이가 나타나고 (Li *et al.* 2011), 이는 어류의 이동을 유추하는 데 활용이 가능하다 (Hansson *et al.* 1997; Hobson 1999; Litvin and Weinstein 2004). 본 조사지역에서도 담수 기원의 신호가 하구독 아래 기수지역에서 채집된 어류에서도 나올 것으로 예상하였으나, 담수측에서 하구독 방류시 떠내려간것으로 보이는 뿩경모치를 제외한 대부분의 어류들이 해양에서 기원한 먹이에 치중하고 있는 것으로 확인되었다. 해수와 담수를 자유롭게 왕래할 수 있는 주연성 어류인 가승어와 승어는 주로 유기물을 먹이로 먹는데 (Hadwen *et al.* 2007; Lebreton *et al.* 2011) 본 연구에서 채집된 가승어는 해양에 기원한 신호만 감지되었다. 웅어의 경우 담수지역에서는 오히려 해양성 먹이에 기원한 신호가 감지되었고 하구독 하부인 해수 지역에서 채집된 개체에서는 담수성 먹이에 가까운 신호가 감지되는 결과를 보였는데 이는 소하성 어류인 웅어

의 산란 및 이동, 개체 특성에 따른 결과로 판단된다. 웅어의 주 산란기는 4월에서 8월까지로 (Ge and Zhong 2010; Li *et al.* 2011, 국내의 경우 6월~7월) 산란에 참여하는 성체의 경우 이 시기에 바다에서 담수로 회유하여 담수역에 산란이후 다시 기수역 및 연안으로 이동하고 부화된 개체들은 수류의 흐름에 의해 하류로 내려온 이후 일정 시간 성장기를 거친 이후 기수 및 연안으로 이동한다 (Dou *et al.* 2012). 본 연구에서 담수에서 채집된 웅어의 크기는 전장 210 mm 이상으로 채집 시기가 5월 인 것을 감안하여 파악하였을시 산란에 참여하기 위해서 바다에서 담수로 올라온 개체로, 어류의 근육에서 안정동위원소를 측정할 본 연구방식의 turn over time을 고려하면 담수로 이동하기 전까지 해양에 머물렀던 것으로 판단된다. 반면 기수역에서 채집된 개체의 경우 전장이 83 mm로 전년도에 늦게 부화한 개체가 금강하류 담수부에서 머무르다가 산란을 마치고 바다로 내려가는 개체들과 함께 기수로 이동한 경우로 판단된다. 따라서 안정동위원소 신호가 담수 기원으로 나타난 것으로 판단되며, 이러한 연구 결과는 이석의 Sr:Ca 비율을 통해 웅어의 이동을 파악한 Dou *et al.* (2012)의 결과와 전반적으로 일치하였다. 개소개의 경우는 담수의 영향을 받는것으로 확인되었는데 이는 서식처 특성과 관련이 깊을 것으로 판단되었다. 우리나라 서해안의 경우 조석차이가 상당히 크고 갯벌이 잘 발달되어있어 펄질에 굴을 파서 서식하는 저층성 어류인 개소개에게 적합한 장소이다 (Park 2009). 금강하구독 하류부에는 갯벌이 잘 형성되어 있고 담수측에서 지속적으로 유기물들이 공급되고 있기 때문에 인근에 서식하고 있는 개소개의 신호가 이를 반영했던 것으로 판단된다. 하지만 유사한 서식 습성을 가지고 있는 빨갱이가 해양성에 더 치우친 것을 보아 개체 특성에 의한 결과일 가능성도 간과할 수는 없을 것으로 판단된다.

안정동위원소 중 $\delta^{13}C$ 는 먹이의 기원을 파악할 수 있는 항목 (Michener and Schell 1994; Smit 2001; McCutchan *et al.* 2003)으로 주로 하천의 상류로 올라갈수록 육상 기원의 먹이원에 영향을 받기 때문에 낮아지는 경향을 보인다 (Cunjak *et al.* 2005; Coat *et al.* 2009). 하지만 본 연구에서는 20 km 정도의 거리를 두고 분석을 실시했음에도 불구하고 이와 같은 차이는 확인되지 않았다. 이는 앞서 어류상의 결과에서도 밝혔듯이 금강이 워낙 큰 하천이기도 하고 또한 하구독으로 인해 정체수역으로 바뀌어 조사지역 전반에 유기물이나 먹이 등 전반적으로 안정동위원소 변화에 영향을 줄 수 있는 요인들이 큰 차이가 없었기 때문으로 판단된다. 최근 4대강 공사로 인해 보가

건설되고 보 구간내에 정체수역이 형성되었는데 본 연구 결과를 토대로 예측을 하면 보 구간내의 먹이망 구조가 상류에서 하류에 이르기 까지 유사할 것으로 판단된다.

국내 담수종들의 섭식길드를 안정동위원소 수치와 비교해봤을 때 일부 차이가 있는 것으로 확인되었다. 다양한 원인이 있을 수 있는데 그 중 가장 큰 요인으로는 분석에 사용된 개체수와 크기에 있을 것으로 판단된다. 어류의 경우 성장에 따라 먹이원의 변화(diet shift)가 발생하고 따라서 개체 발생 단계별로 안정동위원소 수치가 달라질 수 있다(Cucherousset *et al.* 2007). 본 분석에서는 육식성으로 분류되어 있는 끄리의 $\delta^{15}\text{N}$ 수치가 본 연구에서는 상당히 낮게 나타났는데 충식성에 가까운 특성을 보였다. 금번 분석에 사용된 끄리는 10 cm 미만으로 Johansson *et al.* (2006)의 분류에 따르면 이 시기의 끄리는 주로 곤충성 먹이를 주로 섭식하고 크기가 10 cm 이상 되기 시작하면서부터 주로 어류를 포식하기 시작한다. 따라서 이 분류에 의하면 금번 분석에 사용된 개체가 충식성으로 분류된 것은 정확한 결과이나 끄리 전체 개체군을 대상으로 했을시에는 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 개체발생단계에 따른 차이는 끄리뿐만 아니고 다른 종에서도 얼마든지 발생할 수 있는 문제로 보다 정확한 결과를 위해서는, 각 연구목적에 따라 분석에 사용하는 개체의 크기나 발생단계를 제한할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 금번 끄리의 분석 결과가 전반적인 모든 끄리의 식성이나 안정동위원소 수치를 대변할 수 없다고 사료되고, 다만 추후 식성이나 먹이원에 관련된 연구시에는 이와 같은 내용을 고려하여 분석을 시행할 필요가 있다.

잡식종은 계절 및 시기에 따라 달라지는 먹이원에 의한 영향을 많이 받고(Bayley 1988; Winemiller 1990); 이에 따라 안정동위원소 값과 영양단계가 달라질 수 있다(Wantzen *et al.* 2002; Hellmann *et al.* 2013). 본 연구에서는 5월달에 채집된 종들만을 대상으로 분석을 시행하였기 때문에 이 시기 약 1~2달 전의 먹이 신호를 확인한 것이다. 따라서 잡식종의 경우도 현재 문헌적으로 분류된 것에서 2종이 다르게 분류되었지만 이와 같은 영향에 의한 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 같은 종류의 어류라도 서식지역과 서식환경에 따라서 trophic guild가 차이가 날 수 있고(Jepsen and Winemiller 2002; Abrantes *et al.* 2004; Burrell *et al.* 2012), 안정동위원소 수치에 차이가 있을 수 있기 때문에 추후에 좀 더 많은 개체를 대상으로 한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 금강 하류역에서 어류상과 안정동위원소 분석을 실시하여 현재 섭식길드와의 차이점을 확인

하였다. 물론 안정동위원소 분석은 어류만을 대상으로 시행하였기 때문에 일차 생산자를 포함한 정확한 먹이망의 구조를 제시할 수는 없다. 하지만 이런 분석을 통해 도출된 어류 식성 및 먹이사슬 내 위치에 관한 결과들은 하천 하류의 유기물 이동과 섭식, 생물상 분포에 있어 하구둑의 문제점 및 금강 하류 수생태계의 현재 상황을 파악하는 데 중요하게 사용될 수 있고, 조사지점들을 관리하고 하구둑을 운영하는 데 중요한 자료로 사용될 수 있다. 따라서 추후 연구에서는 다양한 기원들을 함께 분석하여 보다 자세한 금강의 먹이망 구조를 밝혀 제시할 필요성이 있을 것으로 판단한다.

적 요

본 연구에서는 금강의 먹이망 연구를 위한 기초작업으로 금강 하류에서 출현한 어류만을 대상으로 어류상, 담수역과 해수역에 출현하는 어류의 안정동위원소 차이, 담수어류의 섭식길드에 대한 분석을 실시하였다. 금강 하류지역을 대상으로 2011년 연구를 진행하였으며, 하구둑 기준 상류 20 km, 하류 10 km 구간에서 채집된 어류를 분석에 사용하였다. 섭식길드의 분석은 담수어류만을 대상으로 시행하였으며, 문헌연구를 통해 보고된 섭식길드의 적절성 여부를 판별분석을 통해 확인하였다. 연구 결과 하구둑 상류와 하구둑 하류의 어류상은 완전한 차이가 있는 것으로 확인되었으며, 일부 회유성 어종(웅어, 가승어)들만 양측에서 모두 출현하는 것으로 나타났다. 안정동위원소 분석에서도 하구둑을 기준으로 상류와 하류에 서식하는 종들의 수치가 완전히 다르게 나타났다. 하구둑 하류에서 채집된 개체들의 경우 기수 및 해양 기원의 먹이를 선호하고 담수종의 경우 담수 기원의 먹이를 선호하기 때문으로 판단된다. 일부 회유성 종의 경우 담수에서는 해수 신호가 해수에서는 담수신호가 감지되었는데 이는 생태적 특성에 의한 것으로 사료된다. 판별분석 결과 섭식길드는 문헌과 약간 차이가 나타나는 것으로 확인되었는데 이는 개체 발생 단계에 의한 결과일 것으로 판단되며, 관련된 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 특히 안정동위원소의 경우 지역, 시기, 발생단계에 따라 동일 종이라 할지라도 차이가 존재하기 때문에 이러한 부분을 항상 고려하여야 하며, 가능하다면 지역별로 개체를 분석하여 섭식길드를 제시하는 것이 지역의 어류와 관련된 연구에 있어서 효율적인 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2011년도 금강수계 환경기초조사사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Abrantes K and M Sheaves. 2009. Food web structure in a near-pristine mangrove area of the Australian Wet Tropics. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82:597-607.
- Abrantes KG, A Barnett and S Bouillon. 2014. Stable isotope-based community metrics as a tool to identify patterns in food web structure in east African estuaries. *Funct. Ecol.* 28: 270-282.
- Bayley PB. 1988. Factors affecting growth rates of young tropical floodplain fishes: seasonality and density-dependence. *Environ. Biol. Fish.* 21:127-142.
- Burruss ED, A Duarte, MM Gangloff and L Siefferman. 2012. Isotopic trophic guild structure of a diverse subtropical South American fish community. *Ecol. Freshw. Fish* 22:66-72.
- Cho HY, KH Ra and SU Hong. 1978. A study on the relationship of the physical and chemical environmental factors and benthos in the Keum River water. *Korean J. Limnol.* 11:7-15.
- Coat S, D Monti, C Bouchon and G Lepoint. 2009. Trophic relationships in a tropical stream food web assessed by stable isotope analysis. *Freshw. Biol.* 54:1028-1041.
- Cucherousset J, JC Aymes, F Santoul and R Céréghino. 2007. Stable isotope evidence of trophic interactions between introduced brook trout *Salvelinus fontinalis* and native brown trout *Salmo trutta* in a mountain stream of south-west France. *J. Fish Biol.* 71(Suppl. D):210-223.
- Cunjak RA, JM Roussel, MA Gray, JP Dietrich, DF Cartwright, KR Munkittrick and TD Jardine. 2005. Using stable isotope analysis with telemetry or mark-recapture data to identify fish movement and foraging. *Oecologia* 144:636-646.
- Dou SZ, D Yokouchi, X Yu, L Cao, M Kuroki, T Otake and K Tsukamoto. 2012. The migratory history of anadromous and non-anadromous tapertail anchovy *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary revealed by the otolith Sr:Ca ratio. *Environ. Biol. Fish.* 95:481-490.
- Ge KK and JS Zhong. 2010. Daily-age structure and growth characteristics of *Coilia nasus* larvae and juveniles in the surf zone of Yangtze River Estuary. *Acta Hydrobiol. Sinica* 34:716-721 (in Chinese with English abstract).
- Gehrke PC, DM Gilligan and M Barwick. 2002. Changes in fish community of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa dam, Australia. *River Res. Appl.* 18:265-286.
- Habit E, MC Belk and O Parra. 2007. Response of the riverine fish community to the construction and operation of a diversion hydropower plant in central Chile. *Aquat. Conserv.* 17: 37-49.
- Hadwen WL, GL Russel and AH Arthington. 2007. Gut content and stable isotope-derived diets of four commercially and recreationally important fish species in two intermittently open estuaries. *Mar. Freshw. Res.* 58:363-375.
- Hansson S, JE Hobbie, R Elmgren, U Larsson, B Fry and S Johansson. 1997. The stable nitrogen isotope ratio as a marker of food-web interactions and fish migration. *Ecology* 78: 2249-2257.
- Hellmann C, B Wissel and C Winkelmann. 2013. Omnivores as seasonally important predators in a stream food web. *Freshw. Sci.* 32:548-562.
- Hobson KA. 1999. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia* 120:314-326.
- Hwang GH, SR Jeon, MO Kim and CS Hoang. 1992. Fish fauna of the lower area of Kum-river. *J. Basic Sci.* 6:53-74.
- Jepsen DB and KO Winemiller. 2002. Structure of tropical river food webs revealed by stable isotope ratios. *Oikos* 96:46-55.
- Johansson F, P Rådman and Andersson. 2006. The relationship between ontogeny, morphology, and diet in the Chinese hook snout carp (*Opsariichthys bidens*). *Ichthyol. Res.* 53:63-69.
- Kim IS and JY Park. 2002. Freshwater fish of Korea. KyoHak Publishing. Seoul.
- Lebreton B, P Richard, EP Parlier, G Guillou and GF Blanchard. 2011. Trophic ecology of mullets during their spring migration in a European saltmarsh: A stable isotope study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 91:502-510.
- Lee CL. 1992. The variations of the fish community after dam construction of the Kum River Estuary. *Korean J. Limnol.* 25:193-204.
- Li WX, R Song, SG Wu, H Zou, P Nie and GT Wang. 2011. Seasonal occurrence of helminthes in the anadromous fish *Coilia nasus* (Engraulidae): parasite indicators of fish migratory movements. *J. Parasitol.* 97:192-196.
- Litvin SY and MP Weinstein. 2004. Multivariate analysis of stable-isotope ratios to infer movements and utilization of estuarine organic matter by juvenile weakfish (*Cynoscion regalis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61:1851-1861.
- Lucas MC and E Baras. 2001. Migration of Freshwater Fishes. Blackwell Science, Oxford.
- Martinez PJ, TE Chart, MA Trammell, JG Wullschlegler and EP Bergersen. 1994. Fish species composition before and after construction of a main stem reservoir on the White River, Colorado. *Environ. Biol. Fish.* 40:227-239.

- McCutchan Jr JG, WM Lewis Jr, C Kendall and CC McGrath. 2003. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos* 102:378-390.
- Michener RH and DM Schell. 1994. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. pp.138-157. In *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* (Lajtha K and RH Michener eds.). Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Nelson JS. 1994. *Fishes of the World*. John Wiley and Sons Inc, New York.
- Park SU. 2009. Habitat and spawning of green eel goby (*Tanioides rubicundus*) distributed in the Sunchun Bay. Master thesis, Chonnam National University.
- Post DM. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods and assumptions. *Ecology* 83:703-718.
- Smit AJ. 2001. Source identification in marine ecosystems. pp. 219-245. In *Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems* (Unkovich M, J Pate, A Meneill and DJ Gibbs eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Wantzen KM, FA Machado, M Voss, H Boriss and WJ Junk. 2002. Seasonal isotopic shifts in fish of the Pantanal wetland, Brazil. *Aquat. Sci.* 64:239-251.
- Winemiller KO. 1990. Spatial and temporal variation in tropical fish trophic networks. *Ecol. Monogr.* 60:331-367.
- Yang HS and SS Kim. 1990. Characteristics of spatio-temporal variation of the water quality in the Lower Keum River. *Bull, Korean Fish. Soc.* 23:225-237.

Received: 27 November 2014

Revised: 27 February 2015

Revision accepted: 2 March 2015