



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

조종천의 어류 군집 특성과
보의 영향

Impacts of Weirs on Fish Community
in the Jojong Stream

2013년 8월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리전공
이 상 현

조종천의 어류 군집 특성과 보의 영향

지도교수 이 도 원

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함
2013년 4월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리전공
이 상 헌

이상헌의 도시계획학 석사학위논문을 인준함
2013년 6월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

댐이나 보와 같은 하천 내 인공구조물은 어류와 하천 생태계에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 우리나라에는 농업 용수 확보 등을 위하여 전국 하천에 34,012개의 보가 설치되어 있다. 보가 하천 생태계에 끼치는 영향을 완화시키기 위하여 내수면 어업법에서는 인공구조물에 어도를 설치하도록 규정하고 있다. 하지만 현재 어도 설치율은 14.9%에 불과하며, 보는 여전히 우리나라 민물고기 생태계에 위협적인 요소로 작용하고 있다.

보의 설치는 크게 두 가지 측면에서 민물고기 생태계에 영향을 준다. 첫째로는 보가 물의 흐름을 막아 유수역이 정수역으로 바뀌어 어류 군집의 변화를 초래하며, 둘째로는 보가 하천을 단절시켜 어류의 이동을 제한한다. 그런데 보가 어류 군집에 끼치는 영향에 대한 대부분의 연구에서는 어류 군집의 변화가 환경의 변화에 의한 것인지 아니면 단절에 의한 것인지 명확히 구분하여 다루고 있지 않다. 하지만 어류 군집의 변화가 어디에서 기인한 것인지에 따라 보가 하천 생태계에 끼치는 영향을 완화시키기 위한 정책의 방향이 달라질 수 있다. 따라서 환경의 변화와 하천의 단절이라는 두 가지 변수를 구분하여 보의 영향을 연구할 필요가 있다.

보가 어류에 끼치는 영향은 어종에 따라 다르게 나타날 것이다. 여러 종류의 물고기는 각각 서로 다른 수질 오염에 대한 내성을 갖고 있으며 선호하는 환경이 다르다. 따라서 어종별 특성에 따라 보의 영향에 대한 취약성도 다를 것이나, 이에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

이 연구에서는 첫째, 환경의 변화와 하천의 단절이라는 두 가지 측면을 분리하여 보의 영향을 파악하고자 했고, 그 중에서 특히

하천 단절에 의한 영향에 주목했다. 둘째, 어종별로 보의 영향에 대한 취약성을 평가했으며, 각각의 어종에 대한 수질 오염 내성도와 환경 선호도, 어도 이용도의 3가지 요소를 기준을 활용했다.

현장 조사는 경기도 가평군에 위치한 조종천에서 이루어졌다. 조사 구간은 보에 의해 7개로 나누어졌고, 각 구간의 환경은 우수역과 정수역으로 대별되었다. 우수역 7개 지점의 환경은 서로 통계적으로 유의한 차이가 없었던 반면, 정수역 6개 지점의 환경은 차이를 보였다. 우수역 간에는 환경의 차이가 없었기 때문에 조사 지점에서의 어류 군집의 차이는 하천 단절에서 기인한 결과로 볼 수 있다. 우수역 특수종(specialist) 중에서 새코미꾸리(*Koreocobitis rotundicaudata*)와 통가리(*Liobagrus andersoni*)가 일부 조사 지점에서 확인되지 않았는데, 해당 지점을 포함한 모든 우수역 지점은 두 종이 서식하기에 적합한 환경을 갖추고 있었다. 따라서 이들이 확인되지 않은 것은 하천 단절에 의한 것으로 유추할 수 있었다.

보에 대한 어종별 취약성을 평가한 결과 새코미꾸리와 통가리가 가장 취약한 것으로 나타났다. 이는 앞서 두 종이 일부 구간에서 확인되지 않았다는 사실과 잘 일치하고 있다. 보의 설치에 대해 크게 영향을 받지 않을 것으로 예상되는 종은 피라미(*Zacco platypus*)였다. 피라미가 여러 하천에 널리 서식하고 있으며, 인공 구조물이 설치된 후 개체수가 급격히 늘어나기도 한다는 점을 반영하는 결과이다.

이 연구는 보가 어류 군집에 끼치는 영향 중에서 환경 변화에 의한 효과를 제거하여 하천의 물리적 단절에 의한 부분만을 평가했다는 데에 의의가 있다. 보의 영향을 보다 세부적으로 분석하기 위해서는 추후 환경 변화에 의한 영향만을 분석하는 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다.

이 연구에서는 19종을 대상으로 어종별 보에 대한 취약성을 평

가했다. 향후 취약성 평가를 위한 세부적인 기준을 마련하고 취약성 평가가 우리나라 민물고기 전체를 대상으로 확대된다면, 지역별 어류 군집에 대한 보의 영향을 세밀하게 평가하기 위한 자료가 될 것이라 생각한다.

주요어 : 보, 어류 군집, 하천 단절, 취약성, 조종천

학 번 : 2011-22322

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 필요성	2
3. 연구의 목적	4
II. 이론적 배경	5
1. 민물고기의 서식 환경	5
2. 회유성 어류의 이동 성향	6
3. 하천의 인공구조물과 어류	8
III. 연구의 방법	10
1. 연구 대상지	10
2. 현장 조사	14
3. 자료 분석	15
4. 보에 대한 어종별 취약성 평가	17
IV. 결과 및 고찰	19
1. 조사 지점의 환경	19
1) 이화학적 환경	19
2) 물리적 환경	20
2. 어류상	25
3. 어류 군집의 분석	27
4. 어류 군집에 대한 보의 영향	31

5. 보에 대한 어종별 취약성 평가 35

V. 결론 38

참고문헌 41

Abstract 47

표 목 차

표 1. 종별 서식지 특성 연구에 활용된 환경 변수	6
표 2. 조사 구간의 어도 설치 현황과 단절의 방향	13
표 3. 이 연구와 Cummins(1962)의 연구에서의 입자 크기에 따른 하상구조 분류	15
표 4. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점에서의 이화학적 환경	19
표 5. 조사 지점에서의 유속과 수심에 대한 Shapiro-Wilk 정규성 검정의 p 값	22
표 6. 유수역에서의 유속과 수심에 대한 Kruskal-Wallis 검정 결과	22
표 7. 유수역에서의 수심에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값	23
표 8. 정수역에서의 유속과 수심에 대한 Kruskal-Wallis 검정 결과	23
표 9. 정수역에서의 유속에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값	23
표 10. 정수역에서의 수심에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값	24
표 11. 조사 지점의 어류상	26
표 12. 환경 변수의 방향량과 반복 수행의 p 값	29
표 13. 유수역 특수종(specialist)의 조사 지점별 개체수 ·	32
표 14. 조종천 출현 어종에 대한 과거 문헌과의 비교	34
표 15. 보에 대한 어종별 취약성	37

그림 목 차

그림 1. 조종천에서의 조사 구간	11
그림 2. 보 하부 유수역의 전경	12
그림 3. 보 상부 정수역의 전경	12
그림 4. 보에 설치된 아이스하버(ice harbor)식 어도의 전경	13
그림 5. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점의 유속에 대한 상자 도표(box plot)	21
그림 6. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점의 수심에 대한 상자 도표(box plot)	21
그림 7. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점에서의 하상구조 비율	24
그림 8. 비모수다차원척도(NMDS)의 스크리 도표(scree plot)	28
그림 9. 비모수다차원척도(NMDS) 결과	28
그림 10. 조사 지점의 계층적 군집 분석(hierarchical clustering)에 대한 계통수(dendrogram)	30

I. 서론

1. 연구의 배경

우리나라에서는 오래 전부터 식수와 농업용수 등의 확보를 목적으로 하천에 보(淤, weir) 등의 인공구조물을 설치해왔다.¹⁾ 그리하여 현재 전국적으로 3,528개 하천에 34,012개의 보가 설치되어 있다(김재옥과 장규상, 2011). 그런데 이러한 인공구조물은 물의 흐름을 막아 하천 흐름의 역동성을 제한하고 단순화시키며, 생태계의 다양성에 부정적인 영향을 끼친다(Poff *et al.*, 1997; Poff *et al.*, 2007). 특히 어류에게는 수문학적인 변화뿐만 아니라 이동의 단절도 초래하기 때문에 해당 지역에서 어류의 개체수가 급감하거나 일부 종이 절멸하는 사례도 많이 알려져 있다(Pringle *et al.*, 2000).

하천에서 인공구조물이 어류에게 끼치는 부정적인 영향을 최소화하기 위하여 내수면어업법에서는 댐이나 보와 같은 인공구조물을 설치할 때 어도(魚道)를 함께 설치하도록 규정하고 있다.²⁾ 하지만 전국 하천의 34,012개 보 중에서 어도가 설치된 곳은 5,081개소로, 어도 설치율은 14.9%에 불과하다(김재옥과 장규상, 2011). 따라서 보는 현재 우리나라의 민물고기 생태계에 위협적인 요소로 작용하고 있다고 할 수 있다.

우리나라 보의 대부분은 규모가 작은 지류 하천에 설치되어 있다.³⁾

1) 국립국어원 표준국어대사전(<http://stdweb2.korean.go.kr/>)에서는 보를 ‘논에 물을 대기 위한 수리 시설의 하나’이며 ‘뚝을 쌓아 흐르는 냇물을 막고 그 물을 담아 두는 곳’으로 정의하고 있다.

2) 내수면어업법의 제2조에서 어도란 ‘하천에서 서식하는 회유성(回遊性) 어류 등 수산생물이 원활하게 이동할 수 있도록 인공적으로 만들어진 수로 또는 장치를 말한다’고 정의하고 있다.

3) 일반적으로 규모가 큰 하천에 ‘강(江)’, 규모가 작은 하천에 ‘천(川)’이라는 명칭을 붙여왔다. 한국농어촌공사에서 조사한 한강 수계의 보에 대한 자료를 살펴

이에 따라 보에 의한 영향은 대부분 지류 하천에 집중되어 있으며, 일부 하천에서는 보가 높은 밀도로 설치되어 있기도 하다. 특히, 하천의 일정 구간에 보가 연속적으로 설치되어 있는 경우에 보 사이의 각 구간은 하천 단절의 위협에 직면하게 된다. 이러한 측면에서 본다면 보와 어류 군집 사이의 관계는 국지 규모(local-scale)에서 보다 뚜렷하게 나타날 것이다.

이 연구에서는 보가 연속적으로 설치되어 있는 하천에서 보가 어류 군집에 어떠한 영향을 끼치는지, 그러한 영향이 어종에 따라서 어떻게 달리 나타나는지, 어도의 설치 여부가 그 영향의 강도를 줄여주는지에 대해 확인하고자 한다. 또한 어종에 따라서 보의 설치에 따른 영향에 얼마나 취약한지 평가하여 향후 보의 영향과 어도 설치의 효과에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구의 필요성

하천에서의 인공구조물의 설치가 어류 생태계에 끼치는 영향에 대해서는 다방면에서 연구가 진행되었다. 댐이나 보가 설치되면 상류부의 환경이 정수역으로 변하게 되면서 어류 군집에 영향을 끼친다(국립수산과학원, 2010a; 양상근 등, 2012). 그리고 어류가 상·하류로 이동하지 못하게 되어 유전자 교환이 차단되기도 하며, 특히 산란을 위해 하천을 이동하는 회유성 어류의 경우에는 심각한 피해를 입을 수 있다(Larinier, 2001; Gehrke *et al.*, 2002; 이신애 등, 2012).

하지만 그러한 변화가 환경 변화에 기인한 것인지 아니면 단절에 기인한 것인지 명확히 밝혀내는 연구는 그리 많지 않다. 대부분의 연구에서는 인공구조물의 설치로 인한 서식 환경 변화와 어류 이동 단절에 따른 변화를 특별히 구분하지 않은 채, 이들의 복합적인 영향과 그 결과를

보면 5,836개의 보 중에서 약 1.8%인 105개만 ‘강(江)’으로 끝나는 이름의 하천에 위치하고 있었으며, 나머지는 모두 ‘천(川)’으로 끝나는 하천에 설치되어 있었다.

함께 다루고 있기 때문이다. 그런데 만약 어류 군집이 변한 주된 이유가 어류 이동 통로의 단절이라면, 이동 통로 확보를 위한 어도 설치는 어류 생태계의 회복을 위해 의미가 있다. 반면 유수역이 정수역으로 바뀌는 등의 환경 변화가 더 큰 요소로 작용할 경우에는, 어도의 설치보다는 신규 보의 설치를 줄이거나 기능을 하지 못하는 보를 철거하는 쪽으로 정책의 방향을 제시하는 것이 바람직하다. 따라서 이 연구에서는 보의 설치가 어류에 끼치는 영향을 확인하기 위해서 환경의 차이와 하천의 단절이라는 두 가지 변수를 명확히 구분하여 현장 조사를 수행했다.

한편 어도에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있으나, 어도의 설치가 댐이나 보 상·하류의 어류 군집에 긍정적인 영향을 주는지에 대한 연구는 많지 않다. 대부분의 연구는 어떻게 하면 어도의 물의 흐름을 어류의 이동에 적합하게 할 수 있는지, 어떠한 형태의 어도가 어류의 이동에 유리한지, 어류의 이용률은 어느 정도인지 등과 같은 어도의 기능적인 측면에 대한 연구에 집중되어 있다(황중서, 2000; 황선도 등, 2009; 윤주덕 등, 2011; 이성현 등, 2012; Noonan *et al.*, 2012). 하지만 일부 종의 경우에 어도를 따라 하천의 상·하류로 이동한다 할지라도 그 개체수가 적다면 정착에 실패할 수 있다. 왜냐하면 개체수가 최소존속개체군(minimum viable population size)의 크기보다 작을 경우 개체군을 유지하지 못할 가능성이 높기 때문이다(Franklin, 1980; Shaffer, 1981). 따라서 단순히 어류가 어도를 이용할 수 있는지 여부도 중요하지만, 어도의 설치가 어류 군집에 실질적으로 영향력을 발휘하는지에 대해서도 직접적으로 평가할 필요가 있다.

보의 설치는 환경의 변화와 하천의 단절을 초래한다. 그런데 어종별로 선호하는 환경이 다르며, 환경에 대한 내성도 다르다. 따라서 보가 어류에게 끼치는 영향은 어종에 따라 차별적으로 작용할 것이다. 하지만 어종별로 보의 영향에 대한 취약성 연구는 아직까지 미미한 실정이다. 어종별 환경 선호도와 내성도를 통해 보의 설치에 대한 취약성을 평가할 필요가 있다. 이는 추후 신규 보의 설치 시, 또는 보가 설치된 구간에서 보가 어류 군집에 끼치는 영향을 평가하기 위한 자료가 될 것이며, 나아

가 지역별로 어류 군집에 대한 보의 영향을 세밀하게 평가하는 데에 활용할 수 있을 것이다.

3. 연구의 목적

연구의 목적은 크게 두 가지로 요약된다. 첫째, 하천의 어류 군집에 대한 분석을 통해 보의 영향을 확인하고자 했다. 보는 하천의 단절과 환경의 변화라는 두 가지 측면에서 어류 군집에 영향을 끼칠 수 있는데, 그 중에서 특히 하천의 단절에 의한 영향에 주목했다. 추가적으로 어도를 설치하는 것이 그 영향의 강도를 줄여줄 수 있는지에 대해서도 확인하고자 했다. 둘째, 어종별로 보의 영향에 대한 취약성을 평가하고자 했다. 보에 의한 하천 단절이 어류에게 끼치는 영향은 어종에 따라 다를 것이나, 우리나라에 서식하는 민물고기에 대해 보에 대한 취약성을 평가한 연구는 많지 않은 실정이다. 이에 따라 이 연구에서는 내성도와 환경 선호도, 어도 이용도의 3가지 요소를 기준으로 취약성 평가를 시도했다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 민물고기의 서식 환경

우리나라에 서식하는 민물고기는 약 200여종이 알려져 있는데, 이들은 각기 다른 환경에서 살아가고 있다(김익수와 박종영, 2002). 하천의 최상류부터 최하류까지 환경이 변함에 따라 서식하는 어종이 달라지며, 비슷한 환경을 선호하는 어종들은 함께 분포하기도 한다(안광국 등, 1992). 그런데 각 민물고기가 살아가는 데에는 다양한 환경 변수가 작용한다. 주요 변수로는 수온과 pH(수소이온농도지수), DO(용존산소), 염도, 전기전도도, 탁도, 수심, 유속, 하상구조, 하천 규모 등이 있다. 이러한 환경 변수들에 따라 하천 내에서 특정 종의 출현 여부와 상대 개체수, 그리고 어류 군집이 다르게 나타나기도 한다(Gorman and Karr, 1978; Taylor *et al.*, 1993; 최재석 등, 1995).

우리나라 민물고기의 서식 환경에 대해서는 몇몇 어종을 대상으로 연구가 진행되어 있다(표 1). 이들 연구에 따르면 우리나라 민물고기들은 일반적으로 여러 가지 환경 변수 중 수심과 유속, 하상구조에 대해 일정하게 선호하는 범위가 있다. 뿐만 아니라 허준욱 등(2011)은 한강 수계의 달천에서 35종에 대해 물리적 서식지에 대한 연구를 했는데, 종마다 수심과 유속에 따라 서로 다른 환경을 선호하고 있었다. 다시 말해서 특정 하천에 어떠한 어종이 살아가는지, 그리고 어떻게 어류 군집이 형성되는지가 결정되는 데에는 수심과 유속, 하상구조의 3가지 변수가 중요하게 작용한다.

수심과 유속, 하상구조 등의 환경 변수들은 종간 경쟁이나 종내 경쟁을 확인하는 데에도 유용한 역할을 한다. Salas and Snyder(2010)의 연구에서 연어과(Salmonidae) 어류의 주야간 서식지 선호는 수심과 유속, 수중 자연구조물에 따라 유의하게 달라졌다. 또한, 백현민 등(2002)은 연

준모치(*Phoxinus phoxinus*)와 금강모치(*Rhynchocypris kumgangensis*)가 유속에 의해 서식지 분리가 이루어짐을 확인했으며, 채병수와 윤희남(2010)에 따르면 두 가지 유형의 참갈겨니(*Zacco koreanus*)가 수심과 유속에 대해 서로 다른 서식지를 선호하고 있었다.

표 1. 종별 서식지 특성 연구에 활용된 환경 변수

종명	연구에 활용된 환경 변수				참고문헌
	유속	수심	하상 구조	기타	
쉬리 <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	○	○	○		송호복과 권오길 (1993)
배가사리 <i>Microphysogobio longidorsalis</i>	○	○	○		송호복과 손영목 (2003)
참갈겨니 <i>Zacco koreanus</i>	○	○	○	○*	허준욱과 서진원 (2011)
피라미 <i>Zacco platypus</i>	○	○	○	○*	허준욱 등 (2009)
왕종개 <i>Iksookimia longicorpa</i>	○	○	○		김익수와 고명훈 (2005)
통가리속 3종 genus <i>Liobagrus</i>	○	○			손영목과 주일영 (1988)

*서식지 유형(여울, 유수역, 소)을 변수로 활용

2. 회유성 어류의 이동 성향

민물고기 중에는 일정한 영역을 지키며 살아가는 종도 있지만, 다른 곳으로 이동을 하는 종류도 많다. 이 중에서 생애 주기 상에서 민물과 바다를 뚜렷하게 오가는 물고기를 일컬어 회유성(diadromous) 어류라고 한다(Myers, 1949; Moyle and Cech, 1996). Myers(1949)에 따르면 회유

성 어류는 이동의 성격에 따라 강하성(catadromous)과 소하성(anadromous), 그리고 양측회유성(amphidromous)으로 나누어진다.

강하성 어류란 민물에서 살다가 산란을 위해 바다로 내려가는 어류로 뱀장어(*Anguilla japonica*)와 무태장어(*A. marmorata*)가 여기에 해당된다. 반대로 소하성 어류는 바다에서 생활하다가 민물로 올라와서 산란하는 어류이며 연어(*Onchorhynchus keta*)와 송어(*O. masou masou*), 큰가시고기(*Gasterosteus aculeatus*) 등이 해당된다. 이에 비해 양측회유성 어류란 생애 주기 상에서 산란기가 아닌 시기에 민물과 바다 사이를 이동하는 어류를 뜻하며, 은어(*Plecoglossus altivelis altivelis*)와 한독중개(*Cottus Hangiongensis*)가 양측회유성 어류로 잘 알려져 있다.

뿐만 아니라 하천 내에서만 특정 시기에 일정한 방향으로 이동을 하는 물고기도 있다. 이를 두고 하천회유성(potamodromous) 어류라고 한다. 여기에 속하는 어류는 비록 바다와의 경계를 넘어가지는 않지만, 산란 등을 목적으로 하천 내에서 먼 거리를 이동한다. 국내에서는 하천회유성 어류에 해당되는 종에 대해서 뚜렷하게 정의되거나 분류된 바가 없지만, 평소에는 큰 하천의 모래가 깔린 바닥에 살다가 산란기인 4월경에 상류로 이동하는 두우쟁이(*Saurogobio dabryi*)가 여기에 해당된다고 볼 수 있다.

그 외에도 다양한 종류의 물고기들이 먹이를 찾아서, 안전한 서식지를 찾아서, 산란을 위해서, 또는 다른 목적으로 이동을 한다(Lucas and Baras, 2001). 열목어(*Brachymystax lenok tsinlingensis*)는 산란기에 활발한 이동을 보이며, 유량의 변화에 따라서도 다른 서식지로 이동하는 것이 확인되었다(윤주덕과 장민호, 2009). 한편, 눈불개(*Squaliobarbus curriculus*)의 경우에는 특정한 방향성을 보이지는 않으나 상류와 하류를 이동하는 것으로 알려져 있다(윤주덕 등, 2012). 따라서 하천에 인공구조물이 설치되면 이러한 인공구조물이 여러 종류의 물고기들의 이동을 막아 이들의 생태에 큰 영향을 끼치는 요소로 작용할 수 있다.

3. 하천의 인공구조물과 어류

하천의 인공구조물은 여러 환경 변수를 변화시킨다. 물의 흐름을 막아 상부의 유속을 감소시키고, 이곳에는 자연스레 모래 등이 쌓여 하상구조가 변화하게 된다. 따라서 이러한 환경을 선호하지 않거나 변화에 적응하지 못하는 어종은 사라지게 되고, 반대로 여기에 적합한 어종은 번성하게 된다. 하지만 우리나라 고유종은 대체로 여울을 선호하는 어종이 많기 때문에 정수역이 늘어나게 되면 고유종들이 생존의 위협을 받기 쉽다(양상근 등, 2012). 반면, 배스(*Micropterus salmoides*)나 블루길(*Lepomis macrochirus*)과 같은 외래어종은 정수역을 선호하는데, 이러한 이유로 인공적으로 만들어진 정수역에서 번성하는 경우가 많다(국립수산과학원, 2010b; 양상근 등, 2012).⁴⁾ 배스와 블루길은 하천 생태계에 큰 교란을 일으켜, 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률에 의해 생태계 교란 생물로 지정되어 있다.⁵⁾ 배스는 1973년에 미국으로부터, 블루길은 1969년에 일본으로부터 자원조성용으로 도입되었으나, 현재 여러 하천과 대형 댐호에 유입되어 토착어류를 포식함으로써 수생태계에 심각한 피해를 입히고 있다(김익수와 박종영, 2002; 국립수산과학원, 2010b).

하천의 인공구조물은 환경 변수의 변화뿐만 아니라 하천의 단절도 초래한다. 이러한 단절은 물고기의 이동을 제한하게 된다. 특히, 회유성 어류는 일생에서 반드시 민물과 바다 사이를 이동해야 하기 때문에 댐이나 보에 의해 이동이 제한되면 치명적인 피해를 입는 사례가 많이 보고되어 있다(Pringle *et al.*, 2000).

하천 단절에서 기인한 부정적인 영향을 최소화하기 위하여 어도를 건설하기도 한다. 하지만 대부분의 어도는 경제성이 있는 연어과 어류의

4) 배스는 ‘큰입배스’ 혹은 ‘베스’로, 블루길은 ‘파랑불우럭’으로 불리기도 하는데, 일반적으로 ‘배스’와 ‘블루길’이라는 이름이 널리 사용되기에 연구에서는 각각 배스와 블루길로 표기했다.

5) 환경부고시 제2013-12호에서 포유류, 양서류·파충류, 어류, 곤충류, 식물 총 18종을 생태계교란 생물로 지정하고 있으며, 그 중에서 어류는 배스와 블루길 2종이 지정되어 있다.

이동을 목적으로 만들어졌기 때문에, 연어과를 제외한 다른 어종의 이동에는 효율적이지 못한 것으로 나타났다(Noonan *et al.*, 2012). 우리나라 하천에 설치되어 있는 어도의 형식은 크게 계단식과 도벽식, 버티컬슬롯(vertical slot)식, 아이스하버(ice harbor)식으로 나누어진다.⁶⁾ 최근 이들 어도의 기능적인 특성과 어류의 이용에 대해 연구가 진행되고 있다. 황선도 등(2009)은 어린 뱀장어(실뱀장어)의 효율적인 소상을 위한 어도의 경사면 각도와 유속, 바닥 재질에 대해 밝혀냈으며, 운주덕 등(2011)은 장흥댐에 설치된 어도의 이용 어류의 종류를 확인하고 발전 방류수가 어류를 유인하는 역할을 한다는 것을 밝혀냈다. 이성현 등(2012)은 백제보의 자연형 어도에서 피라미가 서식지로 이용할 수 있는 공간의 면적에 대하여 수리 모형을 통해 분석했다.

하천 내의 인공구조물은 하천의 연결성을 저하시키며 민물고기의 다양성을 줄이는 결과를 초래할 가능성이 높다. 그렇기 때문에 댐이나 보의 건설 시에 발생할 수 있는 생태적인 영향에 대해서 지속적으로 모니터링하고 관리할 필요가 있다.

6) 어도의 형식은 연구자에 따라 서로 달리 분류된다. 국가어도정보시스템(<https://rawris.ekr.or.kr/rawrismis/2010/sub24.aspx>)에서는 하천에 설치하는 어도를 계단식과 도벽식, 버티컬슬롯식, 아이스하버식의 4종류로 구분하고 있다.

Ⅲ. 연구의 방법

1. 연구 대상지

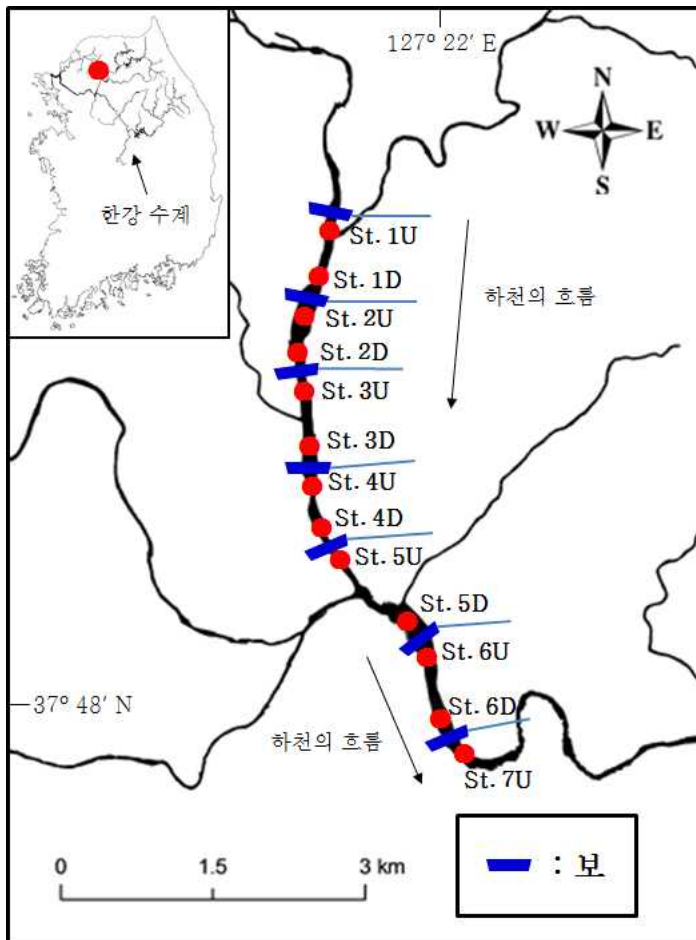
이 연구는 경기도 가평군에 위치한 조종천을 대상으로 진행되었다. 조종천은 경기도 가평군 하면 상판리 일대에서 발원하여 경기도 가평군 청평면에서 북한강과 합류하는 유로연장 39.3 km의 지방하천이다.⁷⁾ 조종천에는 총 76개의 보가 설치되어 있고, 그 중에서 8개의 보에만 어도가 있다.⁸⁾ 조사 구간은 경기도 가평군 하면 신상리와 신하리, 현리, 대보리 일대에 7개 보가 연속적으로 위치한 곳에서 13개 지점을 선정했다(그림 1). 전체 구간은 7개의 보에 의해서 7개의 구간으로 나누어져 있다. 조사 지점의 표기는 보에 의해 나누어진 구간을 기준으로 상류부터 1부터 7까지의 숫자를 부여하되 각 구간의 상류(또는 보의 하부)에는 알파벳 “U”를 붙이고, 각 구간의 하류(또는 보의 상부)에는 알파벳 “D”를 표기하여 상류와 구분했다.

이곳을 조사 구간으로 선정한 이유는 다음의 세 가지 특성 때문이다. 첫째, 보 사이의 간격이 다른 지역에 비해 비교적 차이가 적어, 구간의 길이에 따라서 서식지의 특징과 어류 군집이 달라지는 효과를 최소화할 수 있다. 둘째, 보 사이의 각 구간은 상류의 우수역과 하류의 정수역으로 뚜렷하게 대비되어, 우수역에서의 어류 군집과 정수역에서의 어류 군집을 동시에 비교할 수 있는 지점이다(그림 2, 3). 셋째, 7개 구간의 상·하류에 위치한 7개의 보 중에서 3개의 보에 어도가 설치되어, 어도의 설치 여부가 어류의 군집에 끼치는 영향을 확인할 수 있다.

7) 한국하천정보시스템(<http://river.kwater.or.kr/garam/>)에서는 조종천의 종점을 경기도 가평군 외서면으로 기재하고 있으나, 외서면은 2004년 12월 1일부로 청평면으로 개칭되었기 때문에 여기에서는 청평면으로 표기했다.

8) 국가어도정보시스템(<https://rawris.ekr.or.kr/rawrismis/2010/sub24.aspx>)을 통해서 확인한 내용으로, 이는 2010년 12월 기준으로 작성된 것이다.

2013년 2월 22일에 1차 조사를 진행했는데, 2개의 보에 어도가 새로 설치된 것을 확인할 수 있었다. 그리하여 현재는 7개의 보 중에 5곳에 어도가 설치되어 있다. 어도의 형식은 모두 아이스하버식이었으며, 어도 내에 충분한 물이 흐르고 있어 현재 어도의 기능을 잘 하고 있는 것으로 판단되었다(그림 4). 조사 구간의 보에 대한 어도 설치 현황과 단절의 방향은 표 2와 같다.



*U: 구간의 상류(보의 하부), D: 구간의 하류(보의 상부)

그림 1. 조중천에서의 조사 구간



그림 2. 보 하부 유수역의 전경



그림 3. 보 상부 정수역의 전경



그림 4. 보에 설치된 아이스하버(ice harbor)식 어도의 전경

표 2. 조사 구간의 어도 설치 현황과 단절의 방향

조사 구간	상류 보의 어도	하류 보의 어도	비고
1	아이스하버식	없음	하부 단절
2	없음	없음	상하 단절
3	없음	아이스 하버식	상부 단절
4	아이스하버식	아이스 하버식	연결
5	아이스하버식	아이스 하버식	연결
6	아이스하버식	아이스 하버식	연결
7	아이스하버식	-	연결

2. 현장 조사

현장 조사는 2013년 2월 22일과 3월 29-31일, 5월 10-11일 총 3회 실시했다. 각 구간은 상류 유수역과 하류 정수역의 2개 지점으로 분리했다. 각 구간에서의 유수역은 상부의 보에서 시작해서 아래로 150 m가 되는 지점으로 한정했고, 어도가 있는 경우에는 어도 입구로부터 아래로 150 m를 조사했다. 그러나 유수역이 짧은 구간도 일부 있었는데, 이 경우에는 단면의 평균 유속이 5 cm/s 이하로 떨어지는 지점을 한계선으로 설정하여 해당 단면까지만 조사했다.⁹⁾ 한편, 정수역은 보로부터 위쪽 150 m까지로 설정했다.

연구지 중 St. 7U의 하류로는 약 8 km가 넘는 구간 동안 보가 설치되어있지 않으며, 그 사이에 정수역으로 뚜렷이 특징지을 수 있는 구간이 나타나지 않았다. 따라서 7번 구간에서는 상류 유수역만을 조사했으며, 이에 조사는 7개 구간 총 13개 지점에서 이루어졌다.

어류의 채집은 투망(망목 7×7 mm)과 족대(망목 4×4 mm)를 통해 실시했다. 채집된 어류는 현장에서 종과 개체수를 확인한 후 방류했으며, 종의 분류 및 분류체계는 김익수와 박종영(2002)을 참고했다. 1차 조사 시에는 보 위쪽의 정수역이 결빙이 되어있어서 유수역에서만 채집이 가능했으며, 2차와 3차 조사에서는 전 지점에서 채집이 이루어졌다.

조사 지점의 물리적 환경과 이화학적 환경은 2차 조사에서 측정했다.

9) 어류생태 모니터링 가이드라인(김정곤 등, 2011)에서는 하천 환경을 물리적 구조에 따라 여울(riffle)과 유수역(run), 소(pool)로 구분하고 있다. 여울은 강의 바닥이 얇거나 폭이 좁아 물살이 세게 흐르는 곳, 유수역은 물이 흐르는 곳, 소는 자연히 생긴 웅덩이나 저수지 등을 의미한다고 정의하고 있으나, 여기에 대한 정량적인 기준은 제시하지 않고 있다. Jowett(1993)은 여울과 유수역, 소에 대한 기준이 연구자마다 다르다는 점을 지적하며 여기에 대한 기준을 제시하고자 했으나, 연구자들의 주관적인 판단에 의한 구분을 통계적으로 정리하는 데에 그쳤다. 이 연구에서는 편의상 유속에 의해서만 유수역과 정수역을 구분했으며, Gorman and Karr(1978)이 제시한 유속의 기준 중에서 'very slow'보다 빠른 5 cm/s 이상이 되는 곳을 유수역으로 판단했다.

측정 방법은 Lazorchak *et al.*(1998)과 김정곤 등(2011)을 참조했다. 물리적 환경으로는 수심과 유속, 하상구조를 측정했으며, 조사 지점의 3개 단면에서 2 m 간격으로 측정했다. 단, 유속이 크지 않아 충분한 수의 자료를 확보할 수 없는 지점의 경우에는 단면의 수를 늘려서 조사했다. 유속은 Flowwatch(JDC Electronic SA, Switzerland)를 사용하여 수심의 60% 지점에서 측정했고, 하상구조는 Cummins(1962)의 방법을 적용하되 가는 입자의 하상은 모래(sand)와 진흙(mud)으로 통합했다(표 3). 이화학적 환경은 각 지점의 가장 아래 단면에서 YSI 556 MPS(YSI Inc., USA)를 사용하여 수온과 pH, DO, 염도를 측정했다.

표 3. 이 연구와 Cummins(1962)의 연구에서의 입자 크기에 따른 하상구조 분류

하상 입자의 크기(mm)	이 연구	Cummins(1962)
> 256	Boulder(진석)	Boulder
64 - 256	Cobble(호박돌)	Cobble
16 - 64	Pebble(굵은자갈)	Pebble
2 - 16	Gravel(잔자갈)	Gravel
0.1 - 2	Sand(모래)	Very coarse sand, Coarse sand, Medium sand, Fine sand, Very fine sand, Silt, Clay 로 세분화
< 0.1	Mud(진흙)	

3. 자료 분석

보가 어류 군집에 끼치는 전체 영향으로부터 환경 변수의 영향을 구분해내기 위하여 유수역은 유수역끼리, 그리고 정수역은 정수역끼리 묶어서 자료를 분석했다. 각 구간에서의 유수역 사이에 물리적 환경의 차이가 있는지 확인하기 위해 Mann-Whitney 검정과 Kruskal-Wallis 검

정을 수행했으며, 정수역도 동일한 방식으로 확인했다. 만약 분석 결과 유의한 차이가 없는데도 불구하고 어류 군집이 차이가 날 경우에, 이는 환경의 차이가 아닌 하천의 단절에 의한 결과라고 판단할 수 있다.

조사 지점별 어류 군집 분석을 위해서 Shannon and Weaver(1963)의 종다양도 지수(H')와 Pielou(1966)의 균등도 지수(J')를 산출하여 비교했으며, 식은 아래와 같다.

$$H' = -\sum_i p_i \log p_i$$

$$J' = H' / \log S$$

p_i : 총 개체수 중 i 번째 종의 개체수가 차지하는 비율

S : 총 종수

한편, 각 지점에서의 환경 변수와 어류 군집 구조를 확인하고자 비모수다차원척도(nonmetric multidimensional scaling, NMDS) 방법을 적용했다. 어류의 개체수는 $\log(x+1)$ 로 치환하여 사용했으며, 단일 지점에서만 출현한 종은 분석 대상에서 제외했다. 분석을 위한 가장 적절한 차원(dimension)의 수는 스크리 도표(scree plot)에서 급격한 기울기 변화가 있는 지점(elbow)으로 결정했다. 환경 변수의 방향량(vector)은 99,999번 반복(permutation)하여 산출한 결과를 바탕으로 도식화했으며, 유속과 수심은 평균값을 사용했다. 조사 지점 사이의 거리 산출은 Bray-Curtis의 방식을 따랐으며, 식은 아래와 같다.

$$d_{jk} = \frac{\sum_i |x_{ij} - x_{ik}|}{\sum_i (x_{ij} + x_{ik})}$$

d_{jk} : 조사 지점 j 와 k 사이의 거리

x_{ij} : 조사 지점 j 에서 채집된 i 번째 종의 개체수

x_{ik} : 조사 지점 k 에서 채집된 i 번째 종의 개체수

각 조사 지점들이 어느 정도 수준에서 서로 묶이는지 확인하는 데에

는 계층적 군집 분석(hierarchical clustering)을 적용했다. 어류의 개체수는 $\log(x+1)$ 로 치환했으며, 거리의 산출은 Bray-Curtis의 방식을 사용했다. 계통수(dendrogram)의 도식은 완전 결합(complete linkage) 방식을 따랐다. 완전 결합 방식은 생태학에서 특성이 뚜렷이 다른 집단을 구분하고자 할 때 적절한 것으로 알려져 있다(Legendre and Legendre, 1998).

위의 모든 분석은 R version 2.15.3으로 이루어졌으며, 어류 군집 분석에는 Vegan package를 사용했다.

4. 보에 대한 어종별 취약성 평가

어종별 취약성을 평가하는 데에는 두 가지 요소가 작용할 것으로 예상된다. 첫째는 수질 오염에 대한 내성도이다. 국지적인 수질 오염이 생겼을 때에 내성이 강한 종은 지속적으로 생존하여 개체군을 유지할 가능성이 높은 반면, 내성이 약한 종은 개체수가 감소할 것이다. 따라서 내성도가 낮을수록 보가 설치된 구간에서 개체군의 유지에 더욱 취약할 것으로 판단할 수 있을 것이다. 둘째는 특정 환경에 대한 선호도이다. 일정한 환경에 대하여 선호도가 강한 어종일수록 그렇지 않은 어종보다 더 멸종될 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Munday, 2004). Detenbeck *et al.*(1992)은 유수역을 선호하는 어종은 교란이 발생했을 때 회복 속도가 느리며, 회복 속도는 어류의 이동에 방해가 되는 장애물이 있을 때에 더 느려짐을 확인했다. 위의 두 가지 요소는 어류의 기본적인 생존에도 중요하지만, 특히 보에 의한 단절이 존재할 때에는 강도가 증대될 가능성이 높다. 일시적인 교란이 발생했을 때에 어류가 다른 지역으로 이동할 수 있다면 환경이 회복된 후에 다시 정착할 수가 있지만, 보로 인하여 이동이 차단될 경우에는 교란의 영향에서 벗어날 수 없기 때문이다.

보에 의해 발생하는 취약성은 어도의 설치를 통해 완화시킬 수 있다. 어도에 의한 완화 효과도 어종별로 달리 나타날 것이다. 어도의 이용률이 높은 어종은 그렇지 못한 어종에 비해 취약성이 줄어들 수 있다.

따라서 내성도와 환경 선호도, 어도 이용도의 3가지 요소를 통해 조사 지점에 출현한 어종에 대하여 보의 영향에 따른 취약성을 평가했다. 국립환경과학원(2010)은 민물고기를 내성도에 따라 SS(민감종), IS(중간종), TS(내성종)의 세 등급으로 구분하고 있다. 취약성 평가에 있어서 SS는 2점, IS는 1점, TS는 0점을 부여했다. 환경 선호도에 대해서는 특정한 환경에 대하여 뚜렷한 선호가 있는 특수종(specialist)은 1점, 그렇지 않으면 0점을 부여했다. 어도 이용도는 임진강 수계에 건설된 군남댐 어도 이용에 대한 자료를 통하여 그 값을 부여했다. 이 지역을 어도 이용도 판단을 위한 지점으로 선정한 이유는, 어종별 어도 이용에 대한 연구가 있는 지점 중에서 조사 지점과 가장 유사한 어류상을 나타냈기 때문이다. 해당 지역에 서식하고는 있었으나 어도를 이용하지 않으면 1점, 서식하면서 어도를 이용하면 0점을 부여했으며, 서식하지 않는 종에 대해서는 평가하지 않았다. 어류상은 변화근과 이완옥(2006)의 자료를 이용했으며, 어도 이용 여부는 김동섭 등(2013)의 자료를 활용했다.

IV. 결과 및 고찰

1. 조사 지점의 환경

1) 이화학적 환경

조사 지점에서의 이화학적 환경은 표 4와 같다. 각 지점별 수온의 차이가 큰 것을 확인할 수 있는데, 측정이 하루 중 동일한 시간대에 이루어지지 못했기 때문에 이러한 측정값이 나타난 것으로 판단된다. 전체 조사 지점에서의 pH는 6.9-7.4로 나타나 큰 차이가 없었으며 뚜렷한 경향성도 보이지 않고 있었다. DO는 10.5-12.5 mg/L로 나타났는데, 조사 지점이 하천의 상류 지역이며 수온이 낮았기 때문에 DO가 전반적으로 높은 값을 보인 것으로 생각된다. 한편, 염도는 0.03-0.06 ppt의 범위를 보였는데, 하천이 마을을 통과하면서 염도가 증가했다가 마을을 빠져나가면서부터 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.¹⁰⁾ 이는 마을에서의 하수 유입이 원인인 것으로 추정된다.

표 4. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점에서의 이화학적 환경

	St. 1		St. 2		St. 3		St. 4		St. 5		St. 6		St.7
	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U
수온 (°C)	7.8	5.9	8.2	9.0	8.9	9.4	9.2	7.3	10.9	11.4	9.7	9.9	7.4
pH	7.2	7.0	7.2	7.3	7.3	7.4	7.3	7.3	7.1	7.3	7.0	6.9	6.9
DO (mg/L)	12.5	12.0	11.2	11.2	11.8	11.9	11.7	10.8	10.9	12.2	10.5	11.8	12.2
염도 (ppt)	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05

10) 마을은 조사 구간 3-5번 사이에 밀집되어 있다.

2) 물리적 환경

조사 지점에서의 유속과 수심을 상자 도표(box plot)로 나타낸 결과는 그림 5, 6과 같다.

유수역(St. 1U-7U)에서 유속은 물의 흐름이 거의 없는 곳에서부터 60 cm/s 이상의 빠른 곳까지 넓은 범위에서 다양하게 나타나고 있었으며, 각 구간에서 유속의 중간값은 13-24 cm/s였다. 반면에 정수역(St. 1D-6D)에서는 물의 흐름이 거의 없는 것으로 나타났다. 정수역에서 유속의 중간값은 0-2 cm/s였으며, 정수역 전체 지점에서의 최대 유속이 13 cm/s에 불과할 정도로 유속이 느렸다. 다시 말해서 유수역과 정수역은 유속에 있어서 뚜렷한 차이를 보이고 있었다.

수심에 따라서는 유수역과 정수역 사이에 확연한 차이는 없었으나, 전반적으로 정수역이 유수역에 비해 수심이 깊고 변화 폭도 큰 편이었다. 유수역 수심의 중간값은 22-35 cm인 반면, 정수역에서 수심의 중간값은 26-64.5 cm였다. 수심의 최대값도 유수역이 작았는데, St. 6U에서 최대 수심이 99 cm였을 뿐 나머지 6개 지점은 70 cm 이하의 수심을 나타냈다. 하지만 정수역에서는 St. 2D와 St. 4D, St. 5D에서 수심의 최대값이 100 cm를 넘었으며, St. 4D의 최대 수심은 120 cm에 이르렀다.

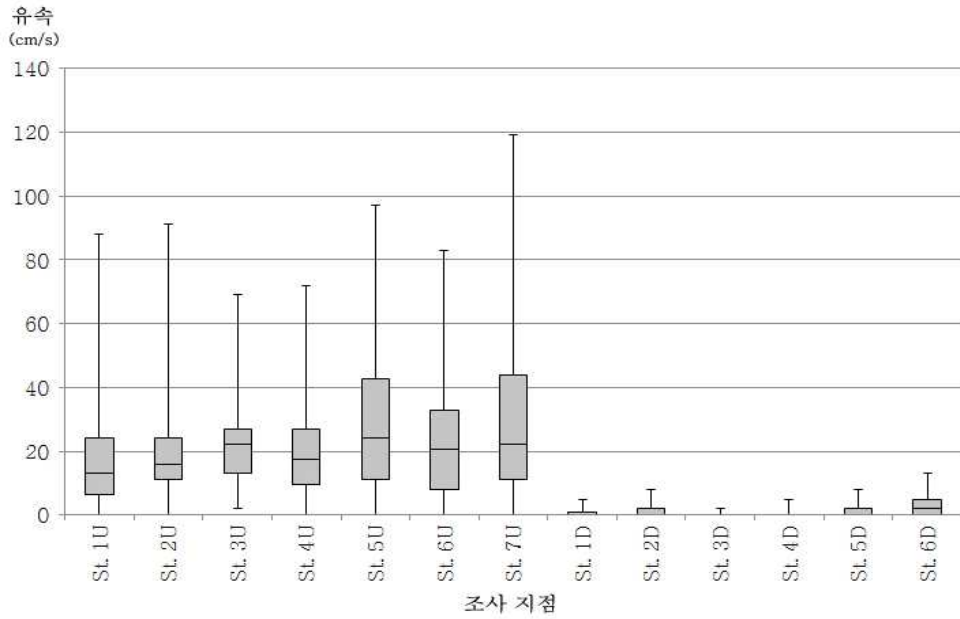


그림 5. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점의 유속에 대한 상자 도표(box plot)

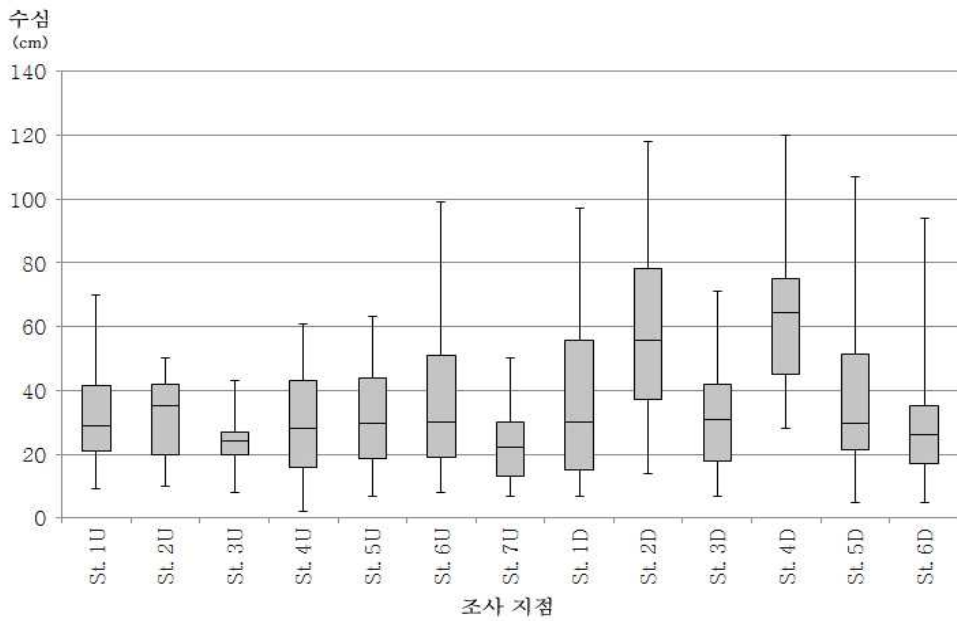


그림 6. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점의 수심에 대한 상자 도표(box plot)

각 지점에서의 유속과 수심의 측정값들이 정규 분포를 따르는지를 확인하기 위하여 Shapiro-Wilk의 정규성 검정을 수행했으며, 그 결과 St. 4U와 St. 7U에서의 수심만 5%의 유의 수준에서 정규 분포를 따르고 있었을 뿐 나머지는 정규 분포를 따르지 않았다(표 5). 따라서 각 조사 지점에서 유속과 수심이 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 확인하기 위해서 비모수 검정 방법인 Kruskal-Wallis 검정을 수행했다. Kruskal-Wallis 검정은 유수역은 유수역끼리, 정수역은 정수역끼리 묶어서 분석했다.

Kruskal-Wallis 검정 결과 각 구간 상류의 유수역에서는 5%의 유의 수준에서 지점별로 유속에 차이가 없었다(표 6). 반면에 수심에 대해서는 조사 지점이 동질적이지 않은 것으로 나타나 각 지점 간에 Mann-Whitney 검정을 통해 환경이 다른 지점을 확인했다. 표 7은 수심에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값을 보여준다. 지점마다 차이의 여부가 달리 나타나지만, 통계적으로 유의한 차이를 보인 것은 모두 St. 3U와 St. 7U와의 관계에서였다. 그리고 St. 3U와 St. 7U는 서로 간에 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서 유수역의 물리적 환경에 대해서 요약

표 5. 조사 지점에서의 유속과 수심에 대한 Shapiro-Wilk 정규성 검정의 p 값

	St. 1U	St. 2U	St. 3U	St. 4U	St. 5U	St. 6U	St. 7U
유속	<0.001*	<0.001*	0.003*	0.001*	0.010*	0.001*	<0.001*
수심	0.043*	0.024*	0.049*	0.141	0.045*	<0.001*	0.051
	St. 1D	St. 2D	St. 3D	St. 4D	St. 5D	St. 6D	
유속	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	
수심	<0.001*	0.027*	0.003*	0.006*	<0.001*	<0.001*	

*p < 0.05

표 6. 유수역에서의 유속과 수심에 대한 Kruskal-Wallis 검정 결과

	χ^2	자유도	p 값
유속	12.4717	6	0.052
수심	19.6938	6	0.003*

*p < 0.05

하자면, 유속은 7개 구간에서 모두 동일하며 수심은 St. 3U와 St. 7U가 조금 알지만 이들을 제외하면 나머지는 동일하다고 판단할 수 있었다.

정수역에 대한 Kruskal-Wallis 검정 결과, 정수역은 유속과 수심에 대해서 조사 지점이 동질적이지 않은 것으로 나타났다(표 8). 각 지점 간의 Mann-Whitney 검정에서 유속은 St. 1D와 St. 4D, 수심은 St. 1D와 St. 3D, St. 5D가 서로 유사함을 확인할 수 있었다. 그러나 나머지 지점 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(표 9, 10).

표 7. 유수역에서의 수심에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값

	St. 1U	St. 2U	St. 3U	St. 4U	St. 5U	St. 6U	St. 7U
St. 1U	-						
St. 2U	0.949	-					
St. 3U	0.018*	0.008*	-				
St. 4U	0.274	0.296	0.388	-			
St. 5U	0.802	0.876	0.074	0.454	-		
St. 6U	0.619	0.729	0.008*	0.156	0.478	-	
St. 7U	0.002*	0.002*	0.293	0.158	0.017*	0.002*	-

*p < 0.05

표 8. 정수역에서의 유속과 수심에 대한 Kruskal-Wallis 검정 결과

	χ^2	자유도	p 값
유속	151.3474	5	<0.001*
수심	173.8735	5	<0.001*

*p < 0.05

표 9. 정수역에서의 유속에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값

	St. 1D	St. 2D	St. 3D	St. 4D	St. 5D	St. 6D
St. 1D	-					
St. 2D	0.026*	-				
St. 3D	<0.001*	<0.001*	-			
St. 4D	0.417	0.006*	<0.001*	-		
St. 5D	<0.001*	0.060	<0.001*	<0.001*	-	
St. 6D	<0.001*	0.005*	<0.001*	<0.001*	0.058	-

*p < 0.05

표 10. 정수역에서의 수심에 대한 Mann-Whitney 검정의 p 값

	St. 1D	St. 2D	St. 3D	St. 4D	St. 5D	St. 6D
St. 1D	-					
St. 2D	<0.001*	-				
St. 3D	0.270	<0.001*	-			
St. 4D	<0.001*	0.077	<0.001*	-		
St. 5D	0.456	<0.001*	0.071	<0.001*	-	
St. 6D	0.046*	<0.001*	0.056	<0.001*	0.001*	-

*p < 0.05

하상구조는 지점마다 조금씩 달랐다. 유수역에서는 굵은자갈 이상의 입자 크기를 가진 구조가 해당 지점에서 최소 절반 이상을 차지하고 있다는 점에서 공통점을 지니고 있었다(그림 7). 이는 물살의 흐름이 있는 여울 지대임을 잘 반영하는 결과이다. 반면 정수역의 하상구조는 모든 지점에서 70% 이상이 잔자갈 이하의 작은 입자로 구성되어 있었다(그림 7). 상류에서 떠내려 온 잔자갈이나 모래, 진흙 등이 보로 인해 막혀서 떠내려가지 못하고 쌓인 것으로 추정된다. 이는 보 바로 위에서의 전형적인 하상구조를 보여준다. 하지만 상류로 올라갈수록, 즉 St. 6D에서 St. 1D로 갈수록 모래보다는 잔자갈의 비율이 높아지는 경향을 확인할 수 있다.

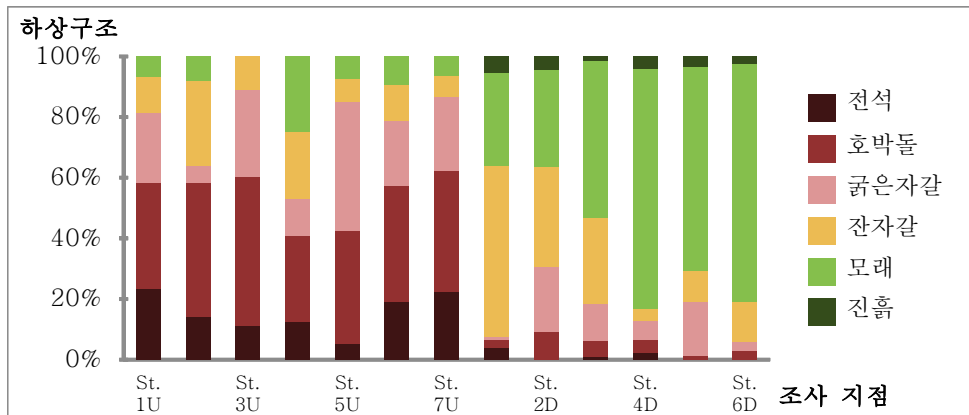


그림 7. 2013년 3월 29-31일에 측정된 조사 지점에서의 하상구조 비율

조사 지점에서 유속과 수심, 하상구조는 유수역 7개 지점과 정수역 6개 지점 사이에 뚜렷한 차이가 있었다. 유수역은 유속이 빠르고 큰 입자의 하상으로 이루어진 반면, 정수역은 물의 흐름이 거의 없고 수심은 다소 깊으며 작은 입자의 하상으로 이루어져 있었다. 세부적으로 살펴보면 유수역 7개 지점 사이에서 유속과 수심은 일부 지점만 제외하면 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 정수역 6개 지점의 환경은 서로 통계적으로 유의한 차이가 있었으나, 전체적으로 유속이 느리며 작은 입자의 하상으로 이루어져 정수역의 특징이 잘 나타나고 있었다.

2. 어류상

어류상은 1, 2, 3차 조사의 결과를 모두 합산했다(표 11). 전체 구간에서 총 22종 2,834개체가 채집되었으며, 각 조사 지점에서는 평균적으로 12종 218개체가 출현했다. 참갈겨니가 전체의 28.4%를 차지하여 우점종으로 나타났으며, 피라미(*Z. platypus*)가 21.9%로 아우점종이었다. 이 두 종은 전체의 약 50%를 구성하고 있었다. 그 다음은 돌고기(*Pungtungia herzi*), 긴물개(*Squalidus gracilis majimae*), 배가사리(*Microphysogobio longidorsalis*)가 각각 10.4%, 7.8%, 5.9%의 순으로 출현했다.

모든 지점에서 출현한 종은 돌고기와 참마자(*Hemibarbus longirostris*), 모래무지(*Pseudogobio esocinus*), 참갈겨니의 4종이었으며, 이들 어종은 유수역과 정수역에서 폭넓게 서식하는 일반종(generalist)으로 볼 수 있다. 반면, 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*)와 대륙종개(*Orthrias nudus*), 새코미꾸리(*Koreocobitis rotundicaudata*), 통가리(*Liobagrus andersoni*), 독종개(*C. koreanus*)의 5종은 유수역에서만 출현했고, 붕어(*Carassius auratus*)와 참붕어(*Pseudorasbora parva*), 긴물개, 얼룩동사리(*Odontobutis interrupta*)의 4종은 정수역에서만 출현했다. 이들은 특정 환경을 선호하는 특수종으로 판단할 수 있다.

표 11. 조사 지점의 어류상

종명	약어	St. 1U	St. 2U	St. 3U	St. 4U	St. 5U	St. 6U	St. 7U	St. 1D	St. 2D	St. 3D	St. 4D	St. 5D	St. 6D	계	상대 풍부도 (%)
붕어 <i>Carassius auratus</i>	Ca									1					1	0.0
참붕어 <i>Pseudorasbora parva</i>	Pp												4		4	0.1
돌고기 <i>Pungtungia herzi</i>	Ph	6	12	12	9	12	16	15	43	23	58	17	22	50	295	10.4
쉬리 <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	Cs	21	11	26	9	17	18	25							127	4.5
긴몰개 <i>Squalidus gracilis majimae</i>	Sg								28		12	31	112	39	222	7.8
참마자 <i>Hemibarbus longirostris</i>	Hl	3	16	1	1	24	5	3	50	5	3	6	14	9	140	4.9
모래무지 <i>Pseudogobio esocinus</i>	Pe	9	8	3	6	7	1	3	11	8	13	5	7	12	93	3.3
돌마자 <i>Microphysogobio yaluensis</i>	My	9	8	6	3	2	2		64		11	8		8	121	4.3
배가사리 <i>Microphysogobio longidorsalis</i>	Ml	27	9	33	12	23	31	20	2			3		6	166	5.9
버들치 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	Ro			2		1				11		3	2		19	0.7
참갈겨니 <i>Zacco koreanus</i>	Zk	114	73	17	36	30	101	100	68	80	45	38	50	52	804	28.4
피라미 <i>Zacco platypus</i>	Zp	10	39	35	72	112	36	112	3	16	22	115	48		620	21.9
대륙종개 <i>Orthrias nudus</i>	On	6	5	1	1	7	5	3							28	1.0
미꾸리 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	Ma					3				1	1		3		8	0.3
새코미꾸리 <i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	Kr			2			1	5							8	0.3
참종개 <i>Iksookimia koreensis</i>	Ik	7	13	7	5	10	7	2	5	1				1	58	2.0
통가리 <i>Liobagrus andersoni</i>	La			10	3	6	7	8							34	1.2
독종개 <i>Cottus koreanus</i>	Ck		1		1										2	0.1
꺼지 <i>Coreoperca herzi</i>	Ch	4	4	1	4	9	4	6			1				33	1.2
동사리 <i>Odontobutis platycephala</i>	Op	2										1			3	0.1
얼룩동사리 <i>Odontobutis interrupta</i>	Oi									8	2	7	7	1	25	0.9
밀어 <i>Rhinogobius brunneus</i>	Rb	1	8	1	4	2	1			3	1	1		1	23	0.8
개체수		219	207	157	166	265	235	302	274	157	169	235	269	179	2834	
종수		13	13	15	14	15	14	12	9	11	11	12	10	10	22	
종다양도 지수		1.73	2.08	2.15	1.84	2.02	1.85	1.68	1.81	1.63	1.76	1.65	1.68	1.72		
균등도 지수		1.56	1.87	1.83	1.61	1.72	1.61	1.56	1.89	1.56	1.69	1.53	1.68	1.72		

한편 붕어와 참붕어, 독중개, 동사리(*O. platycephala*)는 상대 풍부도가 0.1% 이하로 나타나 조사 구간에서 드물게 서식하고 있었다. 독중개는 계곡에서 주로 살아가는 냉수성 어종으로, 남명모(1997)의 조사에서는 조종천 최상류의 귀목계곡 일대에서만 확인되었다. 독중개가 이번 조사의 St. 2U와 St. 4U에서 발견된 것은 겨울철 수온이 낮을 때 하류로 내려온 것으로 판단되며, 이는 보가 설치되어 있더라도 물고기가 상류에서 하류 방향으로 내려오는 것이 가능함을 보여주는 예라고 할 수 있다.

종다양도 지수는 전체 구간에서 1.63에서 2.15 사이의 값을 나타냈고, St. 3U에서 2.15로 가장 높게 나타났다. 종다양도 지수는 유수역에서 평균 1.91로 정수역의 평균 1.71보다 높았으며, 출현 종수도 유수역은 평균 14종인 반면 정수역은 11종이었다. 다시 말해서 유수역이 정수역에 비해 다양한 종의 서식지 역할을 하고 있었다. 하지만 균등도 지수는 유수역과 정수역이 1.68로 동일하여 지점별로 종의 구성 형태는 유사한 것으로 나타났다.

3. 어류 군집의 분석

단일 지점에서만 출현한 붕어와 참붕어를 제외한 자료를 통해 비모수 다차원척도를 적용했다. 적용에 앞서 분석을 위한 가장 적절한 차원의 수를 결정하기 위하여 스크리 도표를 도식화한 결과는 그림 8과 같다. 가로축에는 차원의 수, 세로축에는 오차의 정도를 보여주는 스트레스(stress)를 나타낸다. 1차원에서는 스트레스가 0.160이었으며, 2차원을 적용했을 때 스트레스가 0.040으로 급격히 감소했다. 이 후 스트레스는 3차원을 적용했을 때 0.028, 4차원을 적용했을 때 0.015로 완만하게 줄어들었다. 그림 8에서 볼 수 있는 것과 같이 2차원에서 가장 급격한 기울기 변화가 있었으며, 이에 따라 2차원의 비모수다차원척도 분석이 적절한 것으로 판단했다. 이때 스트레스 값인 0.040은 Kruskal(1964)에 따라 좋은(good) 설명력을 지닌 수준으로 평가할 수 있었다.

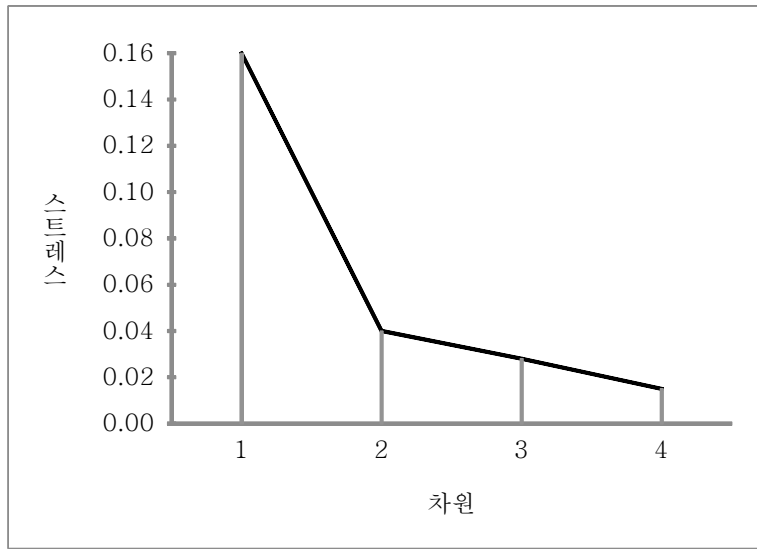


그림 8. 비모수다차원 척도(NMDS)의 스크리 도표(screen plot)

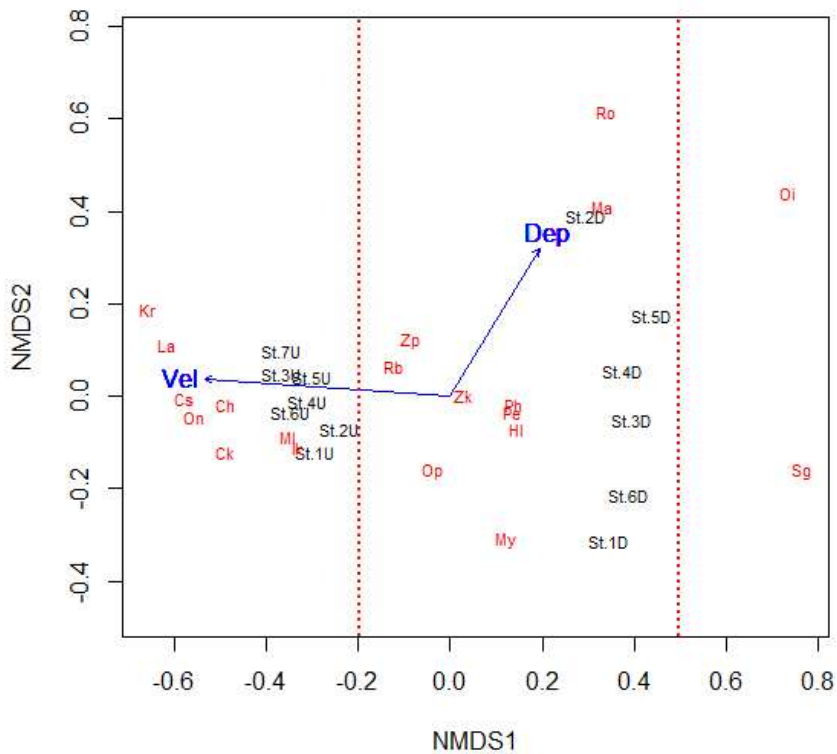


그림 9. 비모수다차원 척도(NMDS) 결과

표 12. 환경 변수의 방향량과 반복 수행의 p 값

변수	NMDS1	NMDS2	r ²	p
유속	-0.997	0.071	0.936	<0.001*
수심	0.518	0.856	0.457	0.044*
수온	0.029	1.000	0.139	0.472
pH	0.216	0.976	0.227	0.275
DO	0.223	-0.975	0.059	0.736
염도	0.294	0.956	0.072	0.686

*p < 0.05

비모수다차원척도 분석 결과는 그림 9와 같다. 어종에 대한 약어의 적용은 표 11에 표기되어 있다. 환경 변수는 유속과 수심, 수온, pH, DO, 염도를 대상으로 5%의 유의 수준에서 유의한 변수만을 도식화했다. 유속은 1축에 대해서만 강한 상관관계를 보이고 있었으며 r²는 0.936으로 설명력이 높다(표 12). 수심은 두 축에 대해 모두 상관관계는 보였지만 1축보다는 2축에 대하여 더 높은 상관관계를 보였으며 r²는 0.457이다.

조사 지점은 두 집단으로 뚜렷하게 구분된다. St. 1U에서 St. 7U까지의 유수역은 1축을 기준으로 좌측에 배열된 반면, St. 1D에서 St. 6D까지의 정수역은 우측에 배열되었다(그림 9). 환경 변수 중 유속이 1축과 강한 상관관계를 가졌는데, 유속에 의해서 유수역과 정수역이 나뉜다는 사실과 일치하고 있다. 그런데 2축에 대해서 유수역은 지점 사이의 거리가 가까우나, 정수역은 2축을 기준으로 유수역에 비해 상대적으로 서로 멀리 떨어져 있는 점을 확인할 수 있다. 이는 앞서 유수역은 수심에 대해서 대체로 동질적이었으나 정수역은 지점 사이에 수심의 차이가 난다는 결과를 반영하는 것이다.

배열된 어종들을 유속에 의해 뚜렷이 구분되는 3개의 집단으로 나눌 수 있었다. 그림 9에서 2개의 붉은색 점선에 의해 3개의 공간으로 나누어진다. 가장 좌측 공간에 배열된 어종들은 유속이 빠른 곳을 선호하는 종으로 쉬리와 배가사리, 대륙중개, 새코미꾸리, 참중개(*Iksookimia koreensis*), 통가리, 독중개, 꺾지(*Coreoperca herzi*)의 8종이 배열되었

다. 앞서 유수역의 특수종으로 판단했던 쉬리와 대륙종개, 새코미꾸리, 통가리, 독종개의 5종은 모두 이 공간에 포함되어 있었다. 반대로 가장 우측의 공간에는 긴물개와 얼룩동사리가 배열되었으며, 비모수다차원척도 분석 대상에서 제외된 붕어와 참붕어와 함께 앞에서 정수역의 특수종으로 판단한 바 있다. 가운데 공간에는 돌고기와 참마자, 모래무지, 돌마자(*M. yaluensis*), 버들치(*R. oxycephalus*), 참갈겨니, 피라미, 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*), 동사리, 밀어(*Rhinogobius brunneus*)의 10종이 배열되었다. 앞에서 일반종으로 판단했던 돌고기와 참마자, 모래무지, 참갈겨니의 4종은 모두 이 공간에 배열되었다.

출현한 어종에 따라 조사 지점 사이의 유사성을 세밀하게 판단하기 위해 계층적 군집 분석을 수행한 결과는 그림 10과 같다.

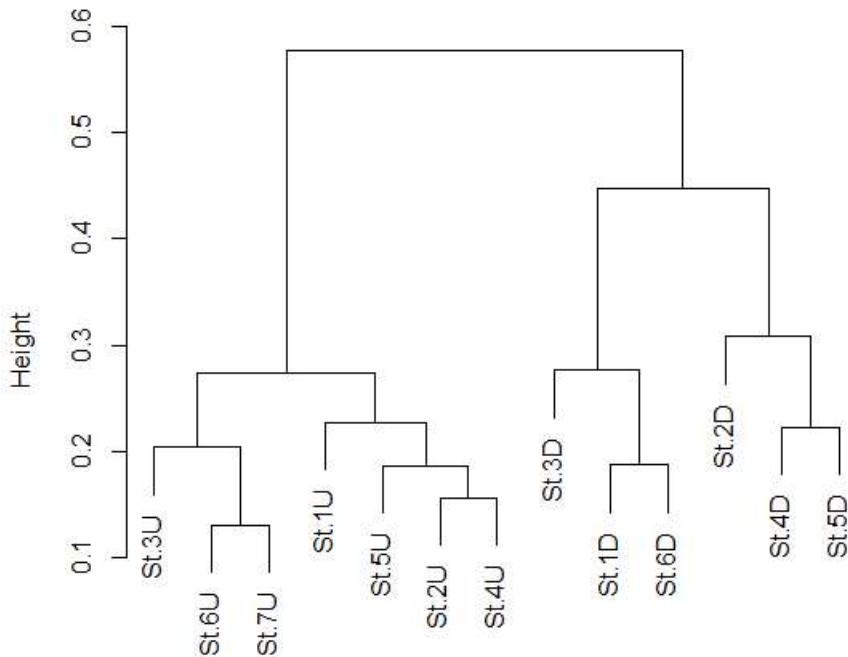


그림 10. 조사 지점의 계층적 군집 분석(hierarchical clustering)에 대한 계통수(dendrogram)

St. 6U와 St. 7U가 0.130의 거리에서 가장 먼저 결합되었다. 이후 유수역끼리 서로 결합되어 0.273의 거리에서 유수역은 하나의 군집으로 묶였다. 한편, 정수역은 St. 1D와 St. 6D가 0.187의 거리에서 처음으로 결합된 후 0.447의 거리에서 정수역이 하나로 묶였다. 정수역이 완전히 결합되는 거리가 유수역보다 멀다는 결과는, 정수역이 유수역에 비해서 환경이 동질적이지 않다는 것이 어류 군집에도 반영되었다는 점을 의미한다. 또한, 이러한 결과는 비모수다차원척도에서의 조사 지점 배열과도 잘 일치하고 있다. 유수역과 정수역은 0.577의 거리에서 최종적으로 하나로 결합되었다.

4. 어류 군집에 대한 보의 영향

보의 설치가 어류 군집에 끼치는 영향 중에서 특히 보로 인한 단절의 영향을 확인하기 위해서는 환경에 따른 영향의 부분을 제거해야 한다. 조사 지점 사이에 어류상이 다르더라도 환경이 서로 다를 경우에는 이것이 환경의 차이에 의한 결과인지, 아니면 단절에 의한 결과인지 판단할 수 없기 때문이다. 따라서 환경이 동질적인 조사 지점끼리 어류상을 비교하여 하천 단절에 의한 영향을 확인하고자 했다.

정수역의 6개 조사 지점 사이에서는 환경이 통계적으로 유의한 차이가 있었기 때문에 환경에 의한 영향을 분리해내기 어려웠다. 반면에 유수역의 7개 조사 지점은 St. 3U와 St. 7U의 수심을 제외하면 전체적으로 유속과 수심, 하상구조가 동질적이라고 판단할 수 있다. 따라서 유수역의 조사 지점들을 중심으로 보에 의한 단절의 영향을 분석했다. 또한, 유수역에서 출현한 어종 중에서 유수역 특수종은 중요한 의미를 지닌다. 유수역 특수종은 일시적인 교란이 발생할지라도 정수역으로 이동하여 생존할 수 있는 능력이 일반종에 비해 떨어진다. 따라서 보로 인한 단절 이후에 다른 지점에서 이동하여 새로 정착하지 않는 한, 해당 지점에서 사멸할 위험이 높다고 할 수 있다. 이러한 특성이 뚜렷하게 나타난다면 유수역에서의 특수종 출현의 경향성을 통해서 단절이 어류 군집에 끼치

는 영향을 확인하는 것이 가능해진다. 유수역에서 출현한 유수역 특수종의 개체수는 표 13에서 보는 바와 같다. 각 종이 출현하지 않은 지점에는 × 표시를 통해 강조했다.

5종의 유수역 특수종 중에서 쉬리와 대륙종개는 유수역의 모든 조사 지점에서 출현했다. 하지만 새코미꾸리와 통가리, 독중개는 일부 지점에서 확인되지 않았다. 독중개는 2개 조사 지점에서 2개체만 확인되었으며, 앞서 언급한 바와 같이 냉수성 어종으로 상류에 서식하다가 수온이 낮은 계절에 일시적으로 내려온 것으로 추정된다. 새코미꾸리는 St. 1U와 St. 2U, St. 4U, St. 5U에서 확인되지 않았으며, 통가리는 St. 1U와 St. 2U에서 출현하지 않았다. 특히 St. 1U와 St. 2U는 두 종이 공통적으로 확인되지 않은 지점이며, 아래쪽이 단절되어 있다(표 2).

새코미꾸리는 북한강 수계의 내린천에서는 하상에 호박돌과 굵은자갈이 많고, 유속이 30-80 cm/s, 수심은 30-80 cm인 곳에 서식하는 것으로 알려졌으며, 이는 St. 1U와 St. 2U의 환경과 유사하다(변화근, 2007). 또한 통가리의 경우에는 유속과 수심의 분포가 각각 70.3 ± 34.9 cm/s, 39.2 ± 21.0 cm인 곳에서 확인된 바가 있는데, 이 역시 유수역 조사 지점의 환경과 중복되는 부분이 많다(손영목과 주일영, 1988). 다시 말해서 St. 1U와 St. 2U는 새코미꾸리와 통가리가 충분히 서식할 수 있는 환경을 갖추고 있음에도 현재는 이곳에 서식하지 않거나, 매우 드물게 서식하고 있다고 볼 수 있다. 통가리의 경우 St. 1U와 St. 2U 이외의 다른 조사 지점에서 희소하게 서식하는 종도 아니었다는 점에서 이러한 사실을 더욱 뚜렷하게 보여준다. 이는 이들 어종이 하천이 보에 의해 단절된 후 국지적인 오염이나 가뭄 등의 사건이 발생해 이곳에서 개체수가 급

표 13. 유수역 특수종(specialist)의 조사 지점별 개체수

종명	St. 1U	St. 2U	St. 3U	St. 4U	St. 5U	St. 6U	St. 7U	계
쉬리 <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	21	11	26	9	17	18	25	127
대륙종개 <i>Orthrias nudus</i>	6	5	1	1	7	5	3	28
새코미꾸리 <i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	×	×	2	×	×	1	5	8
통가리 <i>Liobagrus andersoni</i>	×	×	10	3	6	7	8	34
독중개 <i>Cottus koreanus</i>	×	1	×	1	×	×	×	2

감한 후 기존의 개체수를 회복하지 못한 것으로도 해석할 수 있다. 다만 St. 1U와 St. 2U에서의 어류상의 특성이 어도가 설치되지 않았다는 점에서 기인한 것인지에 대하여 명확한 판단을 내리기에는 자료가 부족하다. 왜냐하면 이와 동일한 경향성이 다른 종에서는 나타나지 않았기 때문이다. 뿐만 아니라 St. 1U와 St. 2U의 종다양성 지수와 균등도 지수가 다른 조사 지점에 비해 특별히 높거나 낮은 경향성도 볼 수 없었다.

조사 구간 전체의 어류상과 과거 어류상의 비교를 통해서도 보가 어류 군집에 끼치는 영향을 확인할 수 있었다. 남명모(1997)와 국립환경과학원(2010)은 조종천의 여러 구간에 대해 어류상을 조사한 바가 있다. 두 연구의 조사 지점 중에서 이 연구의 조사 구간, 즉 경기도 가평군 하면 신상리와 신하리, 현리, 대보리에 포함되는 조사 지점에서의 어류상을 통합하여 표 14에 정리했다.

남명모(1997)의 조사에서는 총 24종, 국립환경과학원(2010)의 조사에서는 총 16종이 확인되었다. 여기에서 주목해야 할 어종은 떡납줄갱이 (*Rhodeus notatus*)와 줄납자루(*Acheilognathus yamatsutae*), 큰납지리 (*Acanthorhodeus macropterus*), 가시납지리(*A. gracilis*) 등 4종의 납자루아과(Acheilognathinae) 어종이다. 이들은 남명모(1997)의 조사에서 출현했었는데, 이 연구에서는 전혀 확인되지 않았다. 납자루아과 어종은 주로 유속이 완만하고 수생 식물이 발달한 곳에서 살아간다(김익수와 박종영, 2002). 따라서 보의 설치 후 어떠한 원인으로 이곳에서 절멸한 후 하류에서 올라오지 못한 것으로 보인다. 어도가 설치되어 있음에도 불구하고 이들이 더 이상 확인되지 않고 있다는 점은 납자루아과 어종의 경우 어도가 설치되더라도 상류로의 이동이 제한될 수 있음을 보여준다.

표 14. 조종천 출현 어종에 대한 과거 문헌과의 비교

종명	남명모 (1997)	국립환경 과학원 (2010)	이 연구
붕어 <i>Carassius auratus</i>	○		○
떡납줄갱이 <i>Rhodeus notatus</i>	○		
줄납자루 <i>Acheilognathus yamatsutae</i>	○		
큰납지리 <i>Acanthorhodeus macropterus</i>	○		
가시납지리 <i>Acanthorhodeus gracilis</i>	○		
참붕어 <i>Pseudorasbora parva</i>			○
돌고기 <i>Pungtungia herzi</i>	○	○	○
쉬리 <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	○	○	○
긴몰개 <i>Squalidus gracilis majimae</i>	○	○	○
참마자 <i>Hemibarbus longirostris</i>	○	○	○
모래무지 <i>Pseudogobio esocinus</i>	○	○	○
돌마자 <i>Microphysogobio yaluensis</i>	○	○	○
배가사리 <i>Microphysogobio longidorsalis</i>	○	○	○
버들치 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	○	○	○
참갈겨니 <i>Zacco koreanus</i>	○	○	○
피라미 <i>Zacco platypus</i>	○	○	○
대륙종개 <i>Orthrias nudus</i>	○	○	○
미꾸리 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	○	○	○
새코미꾸리 <i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	○		○
참종개 <i>Iksookimia koreensis</i>	○	○	○
통가리 <i>Liobagrus andersoni</i>	○	○	○
독종개 <i>Cottus koreanus</i>			○
꺼지 <i>Coreoperca herzi</i>	○	○	○
동사리 <i>Odontobutis platycephala</i>	○	○	○
얼룩동사리 <i>Odontobutis interrupta</i>	○		○
밀어 <i>Rhinogobius brunneus</i>	○		○
종수	24	16	22

5. 보에 대한 어종별 취약성 평가

보에 대한 어종별 취약성을 평가한 결과는 표 15와 같다. 조사에서 확인된 22종 중에서 버들치와 대륙종개, 독종개를 제외한 19종에 대해 취약성을 평가할 수 있었다.

새코미꾸리와 통가리가 4점으로, 보의 설치의 영향에 대해 가장 취약한 것으로 나타났다. 두 종은 수질 오염에 대한 내성이 강하지 않으며 특정 환경을 뚜렷하게 선호하면서, 어도도 이용하지 않는 것으로 나타났기 때문에 가장 취약성이 높다는 결과를 보였다. 이는 St. 1U와 St. 2U에서 새코미꾸리와 통가리가 확인되지 않은 사실과 같은 맥락에서 해석할 수 있다. 취약성이 가장 낮은, 다시 말해서 보의 설치에 크게 영향을 받지 않을 것으로 예상되는 종은 피라미였다. 피라미는 환경 변화에 대한 적응력이 강해 여러 하천에서 광범위하게 서식하고 있으며, 인공구조물에 의해 환경이 변화되었을 때 개체수가 급격히 늘어나기도 한다(안광국 등, 1992; 이완옥 등, 2008; 최지웅과 안광국, 2008; 양상근 등, 2012). 피라미에 대한 취약성 점수는 이러한 특징을 잘 반영하는 결과이다.

취약성의 세부 항목에서 서로 다른 점수를 나타낸 종에 대해서는 다양한 해석이 가능하다. 예를 들어 쉬리와 긴물개, 동사리, 얼룩동사리의 취약성 점수는 3점으로, 이들 네 종도 보의 설치에 대하여 취약한 편이다. 쉬리와 긴물개만 내성도와 환경 선호도, 어도 이용도의 모든 항목에서 동일한 점수를 받았으며, 이들과 나머지 두 종은 항목별로 점수가 달랐다. 쉬리와 긴물개는 환경 선호도에서 동일한 점수를 받았으나, 쉬리는 유수역을 선호하는 반면 긴물개는 정수역을 선호한다는 점이 다르다. Detenbeck *et al.*(1992)은 유수역에 서식하는 어종이 교란으로부터의 회복 속도가 더 느린 것을 확인한 바 있다. 따라서 두 종 모두 특정한 환경을 선호한다고 할지라도, 유수역에 선호하는 쉬리가 정수역에 서식하는 긴물개에 비해 취약할 것으로 판단할 수 있다. 한편 동사리와 얼룩동사리는 동일한 속(屬, genus)에 분류되는 육식성 어종이다. 이들은 하천에 따라 동사리가 우세하게 서식하기도 하고, 반대로 얼룩동사리가 우세

한 경우도 있다(변화근과 이완옥, 2006; 이완옥 등, 2008). 남명모(1997)의 조사에서 조종천 전체 구간에서는 동사리와 얼룩동사리의 출현 비율이 1:2로 나타났으나, 이번 조사에서는 1:8로 얼룩동사리의 비율이 압도적으로 높다. 이 조사 구간에는 보가 연속적으로 설치되어 있으며, 이에 따라 정수역 구간이 넓게 형성되어 있어서 상대적으로 정수역을 선호하는 얼룩동사리가 우세하게 자리 잡은 것으로 판단할 수 있다. 달리 말하자면 보의 설치에 대해서는 동사리가 얼룩동사리에 비해 더 취약하다. 이처럼 쉬리와 긴몰개, 동사리, 얼룩동사리의 4종은 모두 취약성에서 동일한 3점을 받았지만, 4종 사이에서도 취약성은 서로 다를 것이다. 추후 취약성의 점수에 대해서 세밀한 기준의 마련과 가중치의 부여가 필요할 것으로 생각된다.

표 15. 보에 대한 어종별 취약성

종명	내성도	환경 선호도	어도 이용도	취약성
붕어 <i>Carassius auratus</i>	0	1	0	1
참붕어 <i>Pseudorasbora parva</i>	0	1	1	2
돌고기 <i>Pungtungia herzi</i>	1	0	0	1
쉬리 <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	2	1	0	3
긴물개 <i>Squalidus gracilis majimae</i>	2	1	0	3
참마자 <i>Hemibarbus longirostris</i>	1	0	0	1
모래무지 <i>Pseudogobio esocinus</i>	1	0	0	1
돌마자 <i>Microphysogobio yaluensis</i>	1	0	0	1
배가사리 <i>Microphysogobio longidorsalis</i>	2	0	0	2
버들치 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	2	0	×	×
참갈겨니 <i>Zacco koreanus</i>	2	0	0	2
피라미 <i>Zacco platypus</i>	0	0	0	0
대륙종개 <i>Orthrias nudus</i>	2	1	×	×
미꾸리 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	0	0	1	1
새코미꾸리 <i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	2	1	1	4
참종개 <i>Iksookimia koreensis</i>	1	0	1	2
통가리 <i>Liobagrus andersoni</i>	2	1	1	4
독종개 <i>Cottus koreanus</i>	2	1	×	×
꺼지 <i>Coreoperca herzi</i>	2	0	0	2
동사리 <i>Odontobutis platycephala</i>	2	0	1	3
얼룩동사리 <i>Odontobutis interrupta</i>	1	1	1	3
밀어 <i>Rhinogobius brunneus</i>	1	0	0	1

×: 평가 불가

V. 결론

국지 규모에서 보는 하천의 환경을 크게 유수역과 정수역으로 양분시키고 있었다. 보 아래쪽의 유수역은 유속이 빠르고 하상이 큰 입자로 이루어져 있었으나, 보 위쪽의 정수역은 유속이 느리고 수심은 상대적으로 깊고 가는 입자의 하상이 형성되어 있었다. 각 구간 하류의 정수역은 지점마다 환경의 차이가 있었으며, 어류 군집도 일정한 양상을 확인하지 못했다. 하지만 상류의 유수역은 조사 구간 사이에 큰 환경의 차이가 없었으며, 어류 군집에 있어서 일정한 경향성을 볼 수 있었다.

새코미꾸리와 통가리는 유수역의 특수종으로 나타났으며, 이들은 일부 조사 지점에서 충분히 서식할 수 있는 환경에도 불구하고 서식이 확인되지 않았다. 이는 보가 일부 어종에 대해서는 단절을 초래해 어류 군집에 대해 부정적인 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 하지만 어도의 설치가 이러한 영향을 완화시킬 수 있는지에 대해서는 명확한 결과를 얻지 못했다. 새코미꾸리와 통가리가 일부 조사 지점에서 확인되지 않은 원인에 대해 취약성 평가를 통해서도 유추할 수 있었다. 보의 영향에 대한 취약성 평가에서 새코미꾸리와 통가리는 취약성이 가장 높은 것으로 나타났고, 이는 현장 조사의 결과와 잘 일치하고 있다.

하천이 인공구조물에 의해 직접적으로 이동이 차단된 것도 문제이지만, 환경의 양분되는 것도 문제점으로 지적할 수 있다. 어도의 설치를 통하여 물리적인 단절을 어느 정도 해소시켜준다고 하더라도, 완전히 서로 다른 환경이 연결되어 있다는 점에서 여전히 서식지 파편화(habitat fragmentation) 문제는 개선되지 않기 때문이다. 어도를 통과하여 상부의 정수역에 도달한 어류가 길을 잃어 다시 하류로 되돌아오거나 오랜 시간 동안 헤매는 경우도 많다(Antonio *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2012). 따라서 하천 환경이 파편화되어 있을 경우에는 어류의 이동을 제한할 수 있으며, 특수종에 대해서는 환경의 단절 효과가 더 크게 작용할 수도 있다.

예를 들어 쉬리와 같이 유수역에 대한 선호가 강한 종은 보 하부에서 어도를 통해 상부로 이동을 한다고 할지라도 정수역으로 이루어진 보 상부의 환경에 도달했을 때 더 이상 이동하지 않고 다시 내려올 수도 있다. 어도가 실질적인 이동 통로로 기능하기 위해서는 단순히 보 상부와 하부를 연결시켜주는 데에 그쳐서는 안 된다. 단절된 환경을 서로 연결할 수 있도록 어도 출입구의 위치 개선과 출입구 주변 물의 흐름 개선 등을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

연구를 위한 현장 조사 시기는 2월부터 5월에 한정되었으며, 장마나 태풍과 같은 여름철 집중 강우 이후의 어류상 조사는 이루어지지 못했다. 이에 따라 조사가 연중 어류상의 변화 양상을 반영하지 못했다는 한계가 있다. 다만 여름철 강우 이후 어류상의 변화가 있었다고 할지라도 수량이 안정되는 가을과 겨울이 지난 2월 조사에서도 특정 어종이 발견되지 않았다면, 해당 조사 지점에서 이들 어종은 개체군을 유지하기 위한 개체수에는 여전히 이르지 못했을 가능성이 높다. 따라서 조사 기간 동안의 어류상을 통해 보의 영향을 확인한 것은 유효한 해석이라고 판단할 수 있다.

이 연구는 보의 설치가 어류 군집에 끼치는 영향 중에서 환경 변화에 의한 효과를 제거하여 하천의 물리적 단절에 의한 영향만을 확인했다는 점에서 의의가 있다. 추가적으로 환경 변화에 의한 영향만을 확인하기 위해서는 보의 건설이 예정된 장소에서 건설 전과 후 일정 기간 동안 장기적으로 어류상과 환경 변수의 변화 양상을 조사할 필요가 있다고 생각된다. 이를 바탕으로 보가 어류 군집에 끼치는 영향을 물리적 단절에 의한 부분과 환경 변화에 의한 부분으로 명확히 구분하게 된다면, 보의 영향에 대해 세부적으로 분석하는 데에 기초 자료가 될 것이라 생각된다.

이 연구에서는 현장 조사 자료를 바탕으로 어종별 보에 대한 취약성을 평가했는데, 취약성 평가가 우리나라에 서식하는 모든 민물고기를 대상으로 확대된다면 추후 지역별로 어류 군집에 대한 보의 영향을 세밀하게 평가할 수 있을 것이다. 다만 어류 군집에 대한 분석만으로는 어도에 의한 연결성 향상 효과를 평가하는 데에 한계가 있었으며, 이에 따라 향

후 어종별 어도 이용률에 대한 연구와 병행한 연구가 진행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 국립생물자원관(2011), 「한국의 멸종위기 야생동·식물 적색자료집: 어류」, 인천: 국립생물자원관.
- 국립수산과학원(2010a), 「담수 서식지 변화 실태조사」, 국립수산과학원 사업보고서.
- 국립수산과학원(2010b), 「외래어종 서식 분포, 이용 및 관리방안 연구」, 국립수산과학원 사업보고서.
- 국립환경과학원(2010), 「수생태계 건강성 조사 및 평가」, 인천: 국립환경과학원.
- 김동섭 · 황종서 · 황길순 · 허우명 · 송행섭(2013), “군남댐 어도에서 수중생물의 이동과 서식”, 「한국하천호수학회 · 한국생태학회 · 한국환경생물학회 공동학술발표대회」, 31-33.
- 김익수 · 고명훈(2005), “섬진강에 서식하는 왕종개 *Iksookimia longicorpa* (Cobitidae)의 생태”, 「한국어류학회지」, 17(2): 112-122.
- 김익수 · 박종영(2002), 「한국의 민물고기」, 서울: 교학사.
- 김재욱 · 장규상(2011), “전국의 어도실태 전수조사 및 국가어도정보시스템(NFIS) 구축”, 「물과 미래」, 44(7): 50-55.
- 김정곤 · 서진원 · 이상욱 · 허준욱 · 박정은 · 박진우 · 김세현 · 김경훈(2011), 「어류생태 모니터링 가이드라인」, 일산: 이코리버21 연구단.
- 남명모(1997), “조종천의 어류상과 군집구조”, 「한국하천호수학회지」, 30(4): 367-375.
- 백현민 · 송호복 · 심하식 · 김영건 · 권오길(2002), “연준모치, *Phoxinus phoxinus*와 금강모치, *Rhynchocypris kumgangensis*의 서식지 분리와 먹이 선택”, 「한국어류학회지」, 14(2): 121-131.
- 변화근(2007), “내린천에 서식하는 새코미꾸리 *Koreocobitis rotundicaudata* (Cobitidae)의 생태”, 「한국어류학회지」, 19(4): 299-305.
- 변화근 · 이완옥(2006), “임진강 하류역의 어류상과 어류군집”, 「한국하

- 천호수학회지」, 39(1): 32-40.
- 손영목 · 주일영(1988), “한국산 통가리속(genus *Liobagrus*) 어류의 생태”, 「한국하천호수학회지」, 21(4): 243-251.
- 송호복 · 권오길(1993), “홍천강에 서식하는 쉬리, *Coreoleuciscus splendidus* Mori (Cyprinidae)의 생태”, 「한국하천호수학회지」, 26(3): 235-244.
- 송호복 · 손영목(2003), “배가사리, *Microphysogobio longidorsalis* (잉어과)의 개체군 생태”, 「한국어류학회지」, 15(4): 303-310.
- 안광국 · 홍영표 · 김재구 · 최신석(1992), “금강 담수어의 대상분포와 군집 분석에 관한 연구”, 「한국하천호수학회지」, 25(2): 99-112.
- 양상근 · 조용철 · 양현 · 강언중(2012), “서식환경이 변화된 용담호의 어류상 및 어류군집 특성”, 「환경생물학회지」, 30(1): 15-25.
- 윤주덕 · 김정희 · 인동수 · 황은지 · 윤조희 · 이영준 · 장광현 · 장민호(2012), “수중 음향 측정방식을 이용한 금강 중·하류의 눈불개 이동성 평가”, 「한국하천호수학회지」, 45(4): 482-489.
- 윤주덕 · 김정희 · 주기재 · 서진원 · Pak, H. · 장민호(2011), “장흥댐에 설치되어 있는 어도와 담수어류의 이용 분석”, 「한국하천호수학회지」, 44(3): 264-271.
- 윤주덕 · 장민호(2009), “Radio tag을 이용한 낙동강 상류에 서식하는 열목어의 이동양상”, 「한국하천호수학회지」, 42(1): 58-66.
- 이성현 · 오국열 · 정태성 · 정상만(2012), “수리모형실험과 수치해석을 통한 자연형어도의 어류서식처 평가”, 「한국수자원학회논문집」, 45(3): 317-329.
- 이신애 · 이완옥 · 석호영(2012), “삼척오십천 상·하류에 분포하는 황어, *Tribolodon hakonensis*(잉어과) 집단의 유전적 분화”, 「한국환경생태학회지」, 26(4): 475-483.
- 이완옥 · 김경환 · 김종화 · 홍관의(2008), “만경강의 담수어류 및 외래어종의 분포”, 「한국어류학회지」, 20(3): 198-209.
- 최재석 · 변화근 · 조규송(1995), “오십천(삼척)의 하천특성과 어류군집에

- 관한 연구”, 「한국하천호수학회지」, 28(3): 263-270.
- 최지용 · 안광국(2008), “영산강 수계의 어류 종 조성 및 분포특성 분석”, 「한국하천호수학회지」, 41(3): 301-310.
- 허준욱 · 강형식 · 장민호(2011), “한강수계 달천의 어류상과 물리적 서식지 조건에 관한 연구”, 「대한환경공학회지」, 33(8): 564-571.
- 허준욱 · 박상영 · 강신욱 · 김정곤(2009), “하천차수에 따른 금강수계 피라미(*Zacco platypus*)의 물리적 서식지 평가”, 「환경생물학회지」, 27(4): 397-405.
- 허준욱 · 서진원(2011), “한강의 대표적 하천에 서식하는 참갈겨니(*Zacco koreanus*)의 물리적 서식조건에 관한 연구”, 「환경영향평가」, 20(2): 206-214.
- 황선도 · 이태원 · 황학빈 · 최일수 · 황선재(2009), “실험 어도에서 실뱀장어의 소상 행동”, 「한국어류학회지」, 21(4): 262-272.
- 황종서(2000), “농업 기반시설의 어도설치 현황과 개선 방안”, 「한국수자원학회지」, 33(2): 41-52.
- Antonio, R. R., Agostinho, A. A., Pelicice, F. M., Bailly, D., Okada, E. K., Dias, J. H. P. (2007), “Blockage of Migration Routes by Dam Construction: Can Migratory Fish find Alternative Routes?”, *Neotropical Ichthyology*, 5(2): 177-184.
- Cummins, K. W. (1962), “An Evolution of Some Techniques for the Collection and Analysis of Benthic Samples with Special Emphasis on Lotic Waters”, *American Midland Naturalist*, 67(2): 477-504.
- Detenbeck, N. E., DeVore, P. W., Niemi, G. J., Lima, A. (1992), “Recovery of Temperate-stream Fish Communities from Disturbance: A Review of Case Studies and Synthesis of Theory”, *Environmental Management*, 16(1): 33-53.
- Franklin, I. R. (1980), “Evolutionary Change in Small Populations”, In: Soulé, M. E., Wilcox, B. A., *Conservation Biology: An*

- Evolutionary-Ecological Perspective*, 135–149, Sunderland: Sinauer Associates.
- Gehrke, P. C., Gilligan, D. M., Barwick, M. (2002), “Changes in Fish Communities of the Shoalhaven River 20 Years after Construction of Tallowa Dam, Australia”, *River Research and Applications*, 18(3): 265–286.
- Gorman, O. T., Karr, J. R. (1978), “Habitat Structure and Stream Fish Communities”, *Ecology*, 59(3): 507–515.
- Kruskal, J. B. (1964), “Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis”, *Psychometrika*, 29(1): 1–27.
- Larinier, M. (2001), “Environmental Issues, Dams and Fish Migration”, In: Marmulla, G., *Dams, Fish and Fisheries: Opportunities, Challenges and Conflict Resolution*, 45–90, Rome: FAO.
- Lazorchak, J. M., Klemm, D. J., Peck, D. V. (Eds.) (1998), *Environmental Monitoring and Assessment Program –Surface Waters: Field Operations and Methods for Measuring the Ecological Condition of Wadeable Streams*, EPA/620/R94/004F, Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency.
- Legendre, P., Legendre, L. (1998), *Numerical ecology (2nd English ed.)*, Amsterdam: Elsevier Science B. V.
- Lucas, M. C., Baras, E. (2001), *Migration of Freshwater Fishes*, Oxford: Blackwell Science.
- Moyle, P. B., Cech, J. J., Jr. (1996), *Fishes: An Introduction to Ichthyology (3rd ed.)*, Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Munday, P. L. (2004), “Habitat Loss, Resource Specialization, and Extinction on Coral Reefs”, *Global Change Biology*, 10(10): 1642–1647.
- Myers, G. S. (1949), “Usage of Anadromous, Catadromous and Allied

- Terms for Migratory Fishes”, *Copeia*, 1949(2): 89–97.
- Noonan, M. J., Grant, J. W. A., Jackson, C. D. (2012), “A Quantitative Assessment of Fish Passage Efficiency”, *Fish and Fisheries*, 13(4): 450–464.
- Pielou, E. C. (1966), “The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections”, *Journal of Theoretical Biology*, 13: 131–144.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromberg, J. C. (1997), “The Natural Flow Regime”, *BioScience*, 47(11): 769–784.
- Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M., Pepin, D. M. (2007), “Homogenization of Regional River Dynamics by Dams and Global Biodiversity Implications”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(14): 5732–5737.
- Pringle, C. M., Freeman, M. C., Freeman, B. J. (2000), “Regional Effects of Hydrologic Alterations on Riverine Macrobiota in the New World: Tropical - Temperate Comparisons”, *BioScience*, 50(9): 807–823.
- Salas, A. K., Snyder, E. B. (2010), “Diel Fish Habitat Selection in a Tributary Stream”, *The American Midland Naturalist*, 163(1): 33–43.
- Shaffer, M. L. (1981), “Minimum Population Sizes for Species Conservation”, *BioScience*, 31(2): 131–134.
- Taylor, C. M., Winston, M. R., Matthews, W. J. (1993), “Fish Species–Environment and Abundance Relationships in a Great Plains River System”, *Ecography*, 16(1): 16–23.
- Yoon, J. D., Kim, J. H., Joo, G. J., Jang, M. H. (2012), “Post–passage Movement of the Fluvial Fish *Zacco temminckii* following

Upstream Transportation by a Fishway Operation in Dam”,
Aquatic Ecology, 46(4): 421-430.

국립국어원, 표준국어대사전, <http://stdweb2.korean.go.kr/>

한국농어촌공사, 국가어도정보시스템, <https://rawris.ekr.or.kr/rawrismis/2010/sub24.aspx>

한국수자원공사, 한국하천정보시스템, <http://river.kwater.or.kr/garam/>

Abstract

Impacts of Weirs on Fish Community in the Jojong Stream

Sang Hun Lee

Department of Environmental Planning

The Graduate School

Seoul National University

Habitat fragmentation by artificial barriers such as weirs and dams has negative impacts on freshwater fish and river ecosystems. In particular, weirs have been constructed to impound water for agricultural purposes, and a total number of 34,012 weirs is installed in South Korea. According to the Inland Water Fisheries Act by the Korean government, it is required to install fishways when artificial barriers are to be constructed. Nevertheless, only 14.9% of the weirs in South Korea have fishways, and, thus, many of the weirs may be one of the major threats to freshwater fish in various river ecosystems.

Weirs affect freshwater fish in two critical ways: (i) they change

habitat characteristics by altering hydrologic regime, and (ii) cause habitat fragmentation. Therefore, policy direction may depend on where the main cause of negative impacts on fish communities comes from. However, little research has been focused on the impact of weirs on fish communities with clear distinction of the two important categories.

Impacts of weirs vary according to fish species, particularly because different fish species have varying tolerance to water quality degradation and have different habitat preferences. However, there are not enough studies on the vulnerability assessment of each species with the presence of weirs.

This study aimed (i) to examine the influence of weirs caused by habitat fragmentation by separating it from the influence caused by alteration of hydrologic regime, and (ii) to investigate the vulnerability of fish to weir construction with the following criteria: tolerance to water quality degradation, habitat preference, and tendency of passing fishways.

In this research, fish fauna and environmental factors were surveyed in the Jojong Stream, Gapyeong-gun, Gyeonggi-do. The study site was divided into seven reaches by weirs, and each reach again was divided into lotic and lentic stations. Environmental variables such as water velocity, water depth, and substratum size were not significantly different among seven lotic stations, while those in six lentic stations showed heterogeneity. It was found that as the habitat environments of lotic stations were statistically homogeneous, difference of fish communities among the stations could be regarded as a result of habitat fragmentation. Two lotic specialists, *Koreocobitis rotundicaudata* and *Liobagrus andersoni*, were not found in several stations despite the fact that every lotic

station provided suitable habitat conditions for them. The absence of *K. rotundicaudata* and *L. andersoni* indicated that fragmentation by weirs affected the populations of the species.

The vulnerability assessment showed that *K. rotundicaudata* and *L. andersoni* were the most vulnerable species to weirs among nineteen species. It was in accordance with the analysis result of fish fauna and environmental factors, thus supporting the implication that the populations of two species were influenced by fragmentation. In this research, the least vulnerable species was *Zacco platypus*. This result reflected the fact that *Z. platypus* is widely distributed throughout the country and the population of the species had increased in some regions where artificial barriers were constructed.

This research identified the impacts of habitat fragmentation by weirs on fish community, not those of hydrologic alteration. Thus, further studies on the influence of hydrologic changes alone are needed to develop the integrated perspectives on the impacts of weirs on fish communities.

The first-time collection of data on the vulnerability of 19 fish species to weirs in the present study may contribute to investigating the impacts of weirs in various regions, particularly through providing preliminary data for the related, expanded studies such as the vulnerability evaluation of the whole freshwater fish species in Korea.

**keywords : Weir, Fish Community, Habitat Fragmentation,
Vulnerability, Jojong Stream**

Student Number : 2011-22322