

얕은 연못에서 수위변동에 따른 담수 어류 피난처 확보를 위한 실험적 접근 An Experimental Approach to Secure Freshwater Fish Shelter according to the Water Level Fluctuations in a Shallow Pond

안창혁 · 주진철 · 이새로미 · 오주현 · 안호상 · 송호면[†]

Chang Hyuk Ahn · Jin Chul Joo · Saeromi Lee · Ju Hyon Oh · Hosang Ahn · Ho Myeon Song[†]

한국건설기술연구원 환경연구실

Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(2013년 8월 26일 접수, 2013년 9월 25일 채택)

Abstract : Physical disturbance, which induces a lack of flow rate, frequently occurs in freshwater ecosystem. Due to this, it is required to provide a new fish shelter to resolve. We installed a pilot scale test-bed to scrutinize the relationship between water level and the influence of fish shelter. The proposed ADP (artificial deep pool) is a fish shelter which composed of concrete materials. From the monitoring results in test-bed, it was observed that the population of fish was the highest at the 0.5 m in depth from the water level of experimental pond. But it was more appropriate for shallow water level (<0.3 m) to conserve the total number of fish by increasing the number per unit area despite of lower inner temperature and DO than outer environment. Therefore, inner of ADP was more efficient lentic system for fish to live due to higher WCS, OS, SS, and TS. In addition, there was a relative abundance of WCS fish species such as *Acheilognathus koreensis* (*A. koreensis*), *Carassius carassius* (*C. carassius*). Considered these results, it is suggested that ADP is appropriate to use for fish shelter and habitat for the fishes in lentic ecosystem.

Key Words : ADP (Artificial deep pool), *A. koreensis*, Lentic system, Water level fluctuations, WCS (Water column species), Target species restoration

요약 : 담수생태계에서 갈수기가 지속되면 다양한 물리적 장애가 발생한다. 이 시기는 어류의 생태 유지용수가 부족하여, 이동이 일어남에 따라 새로운 피난처 및 서식처가 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 실증규모의 실험 시설을 구축하였으며, 수위변화와 어류 피난처의 관계를 분석하였다. ADP (artificial deep pool)는 본 연구에서 제안된 인공적인 깊은 웅덩이이다. 본 시설을 실증규모의 test-bed 실험구에 적용하여 모니터링 한 결과, 수위변화에 따른 어류 개체수는 실험연못의 수심 0.5 m에서 가장 높게 나타났다. 하지만 ADP에서는 낮은 외부 수위 조건(<0.3 m)에서 단위면적당 어류 개체수가 증가하였고, 실험구의 총 어류 군집을 보존하는데 기여하였다. 또한, ADP 내부의 수온과 DO는 외부보다 낮게 조성되었지만, 어류는 지속적으로 서식하였다. 이 결과와 관련하여, ADP 내부는 WCS, OS, SS, TS 등이 높은 효율적인 정수생태계를 나타내었다. 더욱이, ADP 내부의 종풍부도는 *Acheilognathus koreensis* (*A. koreensis*), *Carassius carassius* (*C. carassius*)와 같은 WCS가 높은 비율로 측정되었다. 결국, 수위가 낮게 형성되는 동안 어류는 서식환경의 교란에 의해 수심이 깊은 곳으로 피난하였고, 본 연구 결과를 종합하여 볼 때, ADP는 정수생태계에 적합한 어류 피난 및 서식처로 활용이 가능함을 시사하였다.

주제어 : ADP (Artificial deep pool), *A. koreensis*, 정수생태계, 수위변화, 수층중, 목표종 복원

1. 서론

갈수기 기간 동안 발생하는 물리적 장애(physical disturbance)는 수생태계에서 자연적인 현상이며,^{1,2)} 어류를 포함한 다양한 수생생물의 군집구조, 종 풍부도, 서식밀도 등에 큰 영향을 준다.^{3,4)} 만약, 갈수기가 긴 시간동안 지속되면 수면적이 줄어들고 수체가 감소할 뿐만 아니라 수질이 쉽게 악화되어 어류 서식처에 악영향을 줄 수 있다.⁵⁾ 이 시기의 어류는 시·공간적으로 보다 안정된 피난처를 선호하며, 이때 피난처의 크기, 교란의 세기, 생물의 유영능력 등이 생존에 직접적인 영향을 준다고 알려져 있다.^{6,7)}

한국의 하천은 동고서저(東高西低)의 지형적 특성으로 인해 대부분 동쪽에서 서쪽으로 흐르며, 유로연장이 짧고 유역면적이 작아 유역경사가 급한 편이다.⁸⁾ 그리고 6~9월 사이

에는 집중 강우로 인해 유량이 풍부하지만, 12~3월 사이는 유량이 적어, 전체적으로 유황변화가 크다. 하천 최소유량과 최대유량의 비율을 비교하면 국외(양쯔강 1:22, 라인강 1:14, 템즈강 1:8)에 비해 매우 높은 값(한강 1:393, 섬진강 1:734, 임진강 1:785)을 나타내므로, 국내 갈수기 유량 고갈 현상이 심각한 수준임을 알 수 있다.⁹⁾ 특히 국내 소하천은 수계의 중·상류에 많이 위치하는 탓에 이러한 변화가 더욱 크게 나타난다.⁸⁾ 따라서 소하천은 갈수기에 생태 유지유량 확보가 어렵고 서식처가 교란되기 쉽기 때문에, 상대적으로 서식하는 어류가 적다.

어류의 서식처는 유량이 감소함에 따라 크게 변한다. 유량이 감소하면 수위가 변하게 되고, 어류의 먹이가 되는 미소생물의 서식처가 교란될 수 있으며, 장기적으로는 종조성이 바뀌기도 한다.¹⁰⁻¹²⁾ 또한 갈수기에는 급격한 수온변화,

[†] Corresponding author E-mail: hmsong@kict.re.kr Tel: 031-910-0293 Fax: 031-910-0291

DO 고갈, 영양염 농도 상승 등의 요인으로 수환경이 악화되기 쉬우며, 결국에는 어류 서식지가 훼손되기도 한다.^{13,14)} 특히 급격한 수위 변화는 서식지 사이에서 어류의 이동능력을 저해시킬 뿐만 아니라 정착된 어류 군집에 다양한 영향을 주는 것으로 알려져 있다.^{15,16)}

뚝방은 농경지, 산지, 하천이나 호수의 배후 등에 위치한 소형 저류지(또는 웅덩이)로서 정수생태계에 속한다.¹⁷⁾ 습지분류체계¹⁸⁾를 기준으로 보면, 자연 형성된 경우, 위치나 수문조건 등을 고려했을 때 소택지(palustrine)로 분류되나, 국내 사례처럼 전통적으로 논에 용수공급을 위해 인공 조성된 경우는 농지연못(farm pond)에 더 가깝다. 일반적으로 뚝방은 어류의 먹이가 되는 플랑크톤 및 저서무척추동물 등 미소생물(meiofauna)이 풍부하고, 포식자가 적으며, 수온이 높아 하천과는 다른 서식환경을 제공한다.¹⁹⁾ 특히 논에 설치된 뚝방의 유무에 따라 미꾸리속(Genus Misgurnus)의 서식에 큰 영향을 미치며, 개체군의 안정적인 유지에 직접적으로 관여한다는 선행연구 사례가 있다.²⁰⁾

하지만 전통 뚝방이 자연 하천이나 호수 등에 생태복원용으로 적용될 경우, 갈수기로 인한 일시적인 유량 공급 중단으로 인해 생물의 은신처 및 산란공간이 제한되는 단점이 있다. 본 연구는 전통 뚝방의 서식처 중심의 생태적 기능에 착안하여 갈수기시 생물 서식 공간을 확보한 지하 매립형 구조물인 인공 뚝방(artificial deep pool, ADP)을 설치하여 어류의 피난처로서의 기능을 평가하였다. 본 연구의 주요목적은 국내 담수 환경에서 낮은 수위가 유지되는 기간에 활용 가능한 어류 피난처를 개발하고, 향후 설계인자로 활용할 수 있는 기초 자료를 확보하는데 있다.

2. Materials and methods

2.1. Site description

본 연구는 낙동강 수계인 경상북도 안동시 남후면 하아리에 위치한 한국건설기술연구원 하천실험센터에서 실시하였으며, 실외에 위치한 타원형 연못 2기를 각각 대조구와 실험구로 활용하였다(Fig. 1). 연못은 모두 동일한 규모로 구성되었다. 제원은 길이 26.4 m, 폭 15.6 m, 최대수심 2.4 m, 사면경사 1:2, 하상재료는 모래(지름 2 mm 이하)이며 바닥은 bentonite로 차수하였고, 보다 자세한 사항은 Fig. 2에 나타내었다.

유지용수는 인근의 낙동강 원수를 약 9,000 m³ 규모의 저류지에 1차 저류시킨 후, 두 실험 연못에 동일하게 활용하였다. 연못의 최소 수심을 확보하기 위해 전단과 후단에 위치한 밸브를 선택적으로 활용하였으며, 수심은 측량용 자를 이용하여 실측하였다.

ADP의 제원은 가로 2.6 m, 세로 2.6 m, 높이 1.45 m이며, 콘크리트로 제작하여 실험구 하상의 중앙에 시공하였다. 현장 적합성과 생물서식에 대한 이질감을 최대한 배제하기 위해, 시공 후 10개월간 외부에 자연 상태로 노출시킨 다음 본 실험에 활용하였다. ADP는 덮개(cover)와 본체(main body)로 크게 구분할 수 있다. ADP의 덮개는 실족에 의한 사람의 상해를 방지하기 위함이며, 본체는 어류의 피난 공간을 확보하기 위해 구성되었다. 이와 더불어, 어류의 접근성을 용이하게 하기 위해 덮개에 타공(지름 0.2 m)과 측면 공간(높이 0.4 m)을 구성하였으며, 이를 통해 어류가 본체 내부로 자연스럽게 출입할 수 있도록 하였다.

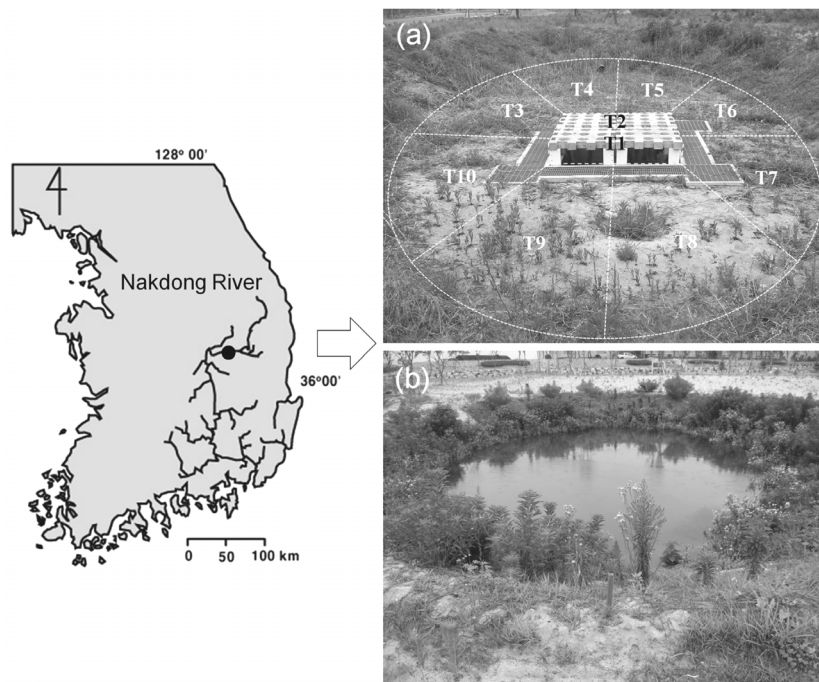


Fig. 1. Site description and installation of ADP in River Experiment Center of KICT (dot point of left figure). (a) Overall view experimental pond and installed ADP in study site. T1~10 is setting point of fish trapping gears. (b) Control pond, which placed next to the experimental pond.

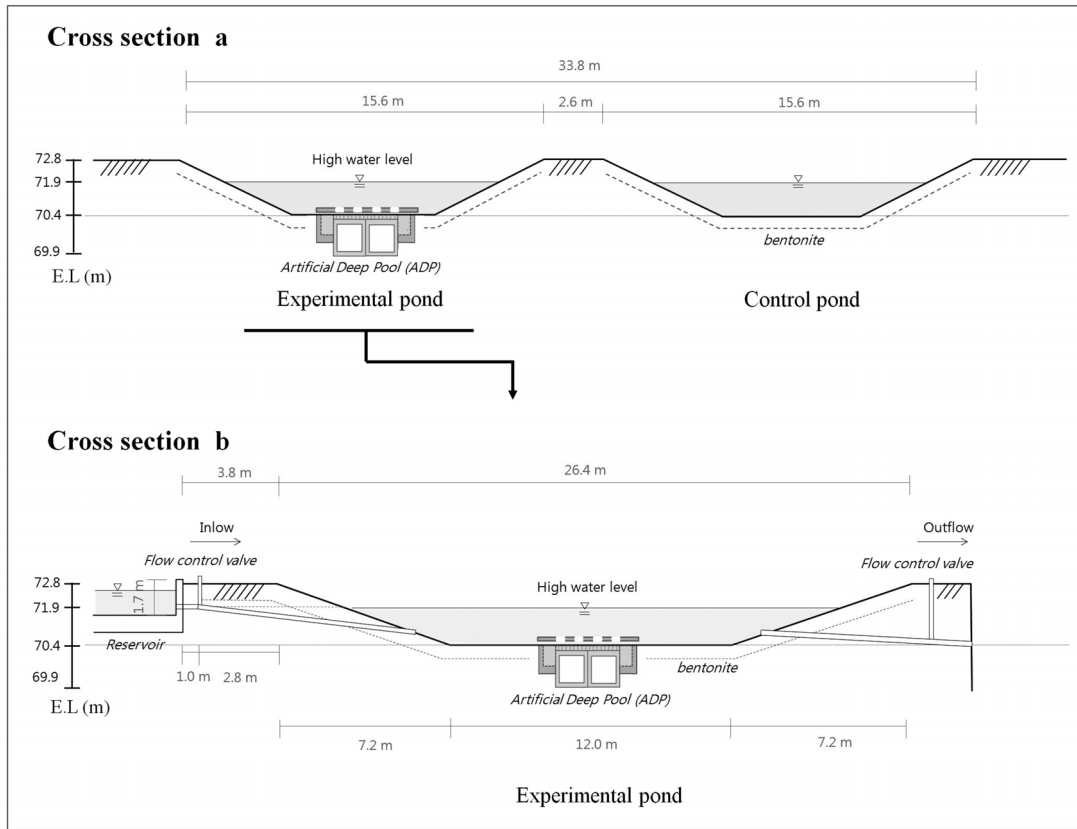


Fig. 2. Cross section views of experimental and control pond.

ADP가 현장에 적용된다면, 토사의 유입을 억제하기 위한 다양한 장치(예: 에어리프트, 부력차단장치)가 추가적으로 고려될 수 있다. 하지만, 본 실험 공간은 유수의 흐름이 거의 없는 정수역이기 때문에 직접적인 토사의 유입은 발생하지 않았다. 따라서, 추가시설의 설치는 생략하였으며, 실험의 용이성을 위해 ADP의 측면에 stainless grating된 측구(가로 0.3 m × 높이 0.4 m)만을 설치하여 토사의 유입을 최소화하였다.

2.2. Experimental fish and monitoring

실험어류는 국내 토종어류 7종을 대상으로 실시하였으며,

8개의 IBI (Index of Biotic Integrity) 변수 항목들을 사용하였다(Table 1).^{21,22)} 주요 변수 항목은, 유수역을 대변한 RBS (riffle benthic species)와 정수역을 대변한 WCS (water column species)로 크게 구분하였고, 그 밖에 SS (sensitive species), TS (tolerant species), OS (omnivore species), IS (insectivore species), TNI (total number of individuals)로 설정하였으며, 어류 군집의 내부 교란과 섭식에 의한 개체수 하락을 피하기 위해 육식종(piscivore species)은 배제하였다. 어류는 실험 공간에서의 생존 지속성 및 개체군 통일성을 위해 낙동강 수계에서 종묘 생산된 개체를 분양받아 활용하였으며, 총 840 개체(7종)를 실험구와 대조구에 각각 방생하

Table 1. List of fish species composition distinguished by IBI criteria of this study

Species	Tolerance guild*							Abundance condition*		Body length (cm)
	NS	RBS	WCS	SS	TS	OS	IS	TNI		
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	○	○	×	○	×	×	×	120	8~10	
<i>Hemibarbus longirostris</i>	○	○	×	○	×	×	○	120	10~13	
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	○	○	×	×	○	○	×	120	8~12	
<i>Rhinogobius brunneus</i>	○	○	×	×	×	×	○	120	5~10	
<i>Acheilognathus koreensis</i>	○	×	○	○	×	○	×	120	7~10	
<i>Carassius carassius</i>	○	×	○	×	○	○	×	120	10~15	
<i>Zacco temminckii</i>	○	×	○	○	×	×	○	120	5~8	
	Total							840	variable	

* abbreviations are as follows; NS = Native species, RBS = Riffle benthic species, WCS = Water column species, SS = Sensitive species, TS = Tolerant species, OS = Omnivore species, IS = Insectivore species, TNI = Total number of Individuals

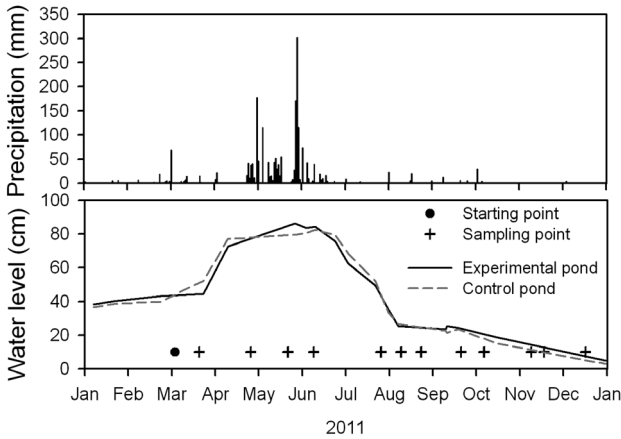


Fig. 3. Precipitation and water level variation of the two experimental ponds. '●' is starting point of this experiment, '+' is sampling points, and line is average water level value of control and experimental pond.

여 2011년 3월~12월 동안(10개월) 총 12회에 걸쳐 모니터링 하였다(Fig. 3).

어류 채집은 일반적으로 nylon net을 이용한 다양한 방법이 활용되고 있으며, 본 연구에서는 collapsible bait trap을 활용하였다. trap net은 어류 개체군의 상대 풍부도(relative abundance), 크기(size), 연령(age), 성장률(growth rate), 수심별 분포 등의 정보를 제공하며, 유수역(lotic system)보다 정수역(lentic system)에서 더욱 효율적인 방법으로 알려져 있다.²³⁾ trap net의 장점은 다양한 종(species)에 적용이 가능한 점이며,²³⁻²⁵⁾ 특히 John²⁴⁾은, trap net이 얕은 연못에서 어류를 모니터링 할 때 타 장비에 비해서 가장 효율적이었다고 보고한 바 있다.

어류 모니터링은 각각의 연못에 10개의 trap net을 투입하여 24시간을 기준으로 CPUE (capture per unit effort) 방법으로 진행하였다. 채집된 어류는 각각의 trap net이 적용된 면적을 고려하여 실험구, 대조구, ADP의 3가지 공간별로 단위면적당 개체수로 표현하여 평가하였다.

기초수질분석용 시료는 ADP의 외부와 내부(뒷개부터 -0.7

m 지점)에서 각각 Van Dorn sampler를 활용하여 채수하였고, 현장용 기기(YSI550A, USA; YSI63, USA)로 수온, pH, DO, 전기전도도를 측정하고 다음 어류의 기본적인 서식 환경을 분석하였다.

강우는 한국 기상청의 안동지점 일 단위 자료를 활용하였다. 총 연강우량은 2,009 mm였으며, 주로 5~6월에 집중 분포 되었다. 연못의 수위는 0.03~0.86 m의 범위를 나타내었는데, 5~6월, 9~10월의 두 차례에 걸쳐서 큰 변동이 있었다. 이때 실험구와 대조구 연못의 수위 변화는 매우 유사하게 나타났다($R = 0.95$, $p < 0.0003$)(Fig. 3). 반면에 ADP는 연못의 하상보다 1.45 m 더 깊은 수심이 유지되므로, 전체 실험기간 동안 1.48~2.31 m의 수심을 나타내었다.

본 연구에서는 다양한 수위 변화를 크게 저수위(low water level; <0.3 m), 평수위(normal water level; 0.3 m~0.6 m), 고수위(high water level; 0.6 m~0.9 m)의 총 3단계로 구분하였다. 저수위~고수위의 평균값은 각각 0.24 m, 0.47 m, 0.80 m이었으며, 연못의 유량 밸브 조절과 강우의 영향으로 인해 3월부터 12월까지 약 3개월 간격으로 평수위→고수위→저수위 단계로 진행되었다(Fig. 3).

3. Results

3.1. Water level fluctuation and fish population

단위면적당 어류 개체수는 대조구, 실험구, ADP의 공간으로 구분하였으며, 결과는 수위변화에 따라 다양하게 나타났다. 전체 실험기간 동안 대조구와 실험구에서 나타난 어류 개체수는 각각 0.25~0.89 ind/m², 0.18~0.83 ind/m²로 서로 유사하였으나, ADP에서는 0.38~1.87 ind/m²로 2배 이상 높게 나타났다(Fig. 4). 특히 저수위 조건(<0.3 m)에서 대조구와 실험구는 0.18~0.39 ind/m²의 범위를 보였으나, ADP는 1.38~1.87 ind/m²를 나타내었다. 결국, ADP 공간에서는 수위가 낮을수록 단위면적당 어류 개체수가 증가하였으며, 어류 개체수는 수위와 높은 음의 상관관계를 보였다($R^2 = 0.76$,

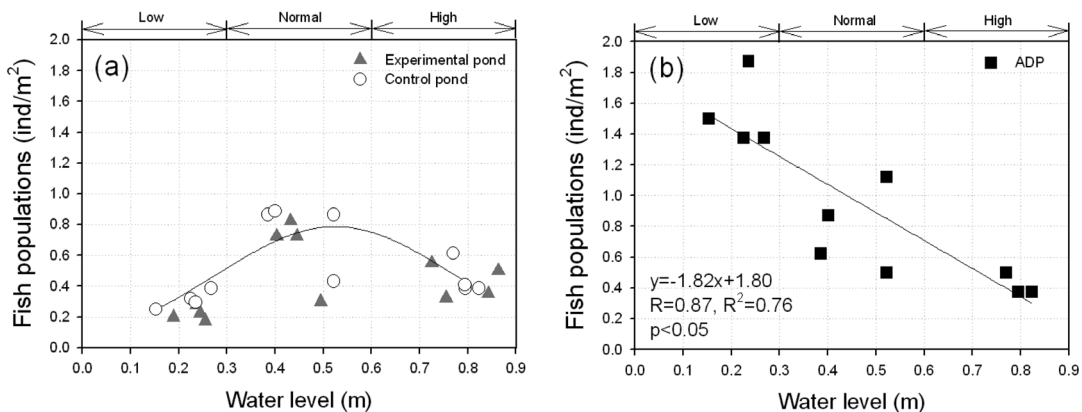


Fig. 4. Changes in fish populations per unit area according to water level fluctuations in the different three spaces. (a) Total fish population versus various water level in experimental and control pond. (b) Total fish population versus various water level in ADP (not included water level in ADP).

$p < 0.05$) (Fig. 4(b)).

ADP를 제외한 일반하상 조건에서는 수위범위 0.39~0.52 m에서 평균 0.70 ind/m²로 가장 높은 어류 개체수를 나타내었다. 일반적으로 어류가 선호하는 유속은 생태적으로 종마다 상이하며, 본 실험 어류의 최적 수심은 약 0.5 m로서 선행 연구 결과와 유사하게 나타났다(Fig. 3(a)).²⁶⁾

3.2. Water quality

방틀돔병의 내·외부의 기초수질 비교를 위해 수온, pH, DO, 전기전도도를 각각 분석하였다(Fig. 5). 측정된 수질은 계절적으로 큰 변동이 없었으며, 실험에 특별한 제한적인 요소는 발견되지 않았다.

수온은 전체 실험기간 동안 6.4~27.5°C의 범위를 나타내었다. ADP 내부의 수온은 외부보다 평균 2.6°C 낮게 측정되었고, 고수위 기간인 7월에 최대 5.8°C까지 차이를 보였다. ADP 내부에서 낮은 수온을 보인 이유는 덮개의 차광효과 및 깊은 수심의 결과로 여겨진다. pH는 7.9~9.7의 약알칼리성을 나타내었으며, 수온이 높은 계절에 상대적으로 큰 값을 보였다. DO는 7.6~9.9 mg O₂/L 범위였으며, ADP 내부에서 평균 1.3 mg O₂/L 낮았다. 이는 ADP 내부가 대기에서 직접적인 산소 공급이 적고, 식물플랑크톤이나 수생식물의 광합성보다는 미생물의 호흡 및 분해가 더 크게 작용하

기 때문에 사료된다. 하지만 6월~8월의 지속적인 강우 기간에는 자연적인 수체의 순환에 의해 ADP의 내·외부 DO가 서로 비슷하게 나타났다. 수중에 이온화된 물질(염)의 농도를 나타내는 전기전도도는 151~189 μS/cm의 범위를 보였으며, 전반적으로 큰 변화가 없었다.

ADP의 내·외부에서 기초수질을 비교하기 위해 상관관계를 분석하였다(Fig. 5). 수온, pH, 전기전도도는 상관계수(R) 0.92~0.98, 결정계수(R²) 0.85~0.97의 유의한 관계를 나타내었다($p < 0.0001$). 하지만 DO는 외부에서 8.1~9.9 mg O₂/L 범위를 보였지만, 내부에서 7.6~8.9 mg O₂/L를 나타내어 다소 차이가 있었다. DO의 경우 비록 ADP의 내·외부에서 상이한 결과가 나왔지만, 어류의 최소 서식환경으로 알려진 5 mg O₂/L 이상을 나타내어,²⁷⁾ 기본적인 어류 서식조건은 충분하다고 판단되었다.

3.3. Fish tolerance guild

Fish tolerance guild는 다변수를 이용한 하천평가 기법인 IBI (Index of Biological Integrity)의 메트릭 중 하나로서 담수 생태계에 서식하는 생물의 건강도, 수질에 대한 민감성의 여부 및 영양단계(trophic structure) 등의 개념을 반영하는 기법으로 알려져 있다.²⁸⁾ 본 연구는 An²⁹⁾이 제시한 우리나라에 적합한 6가지(RBS, WCS, TS, SS, OS, IS) fish

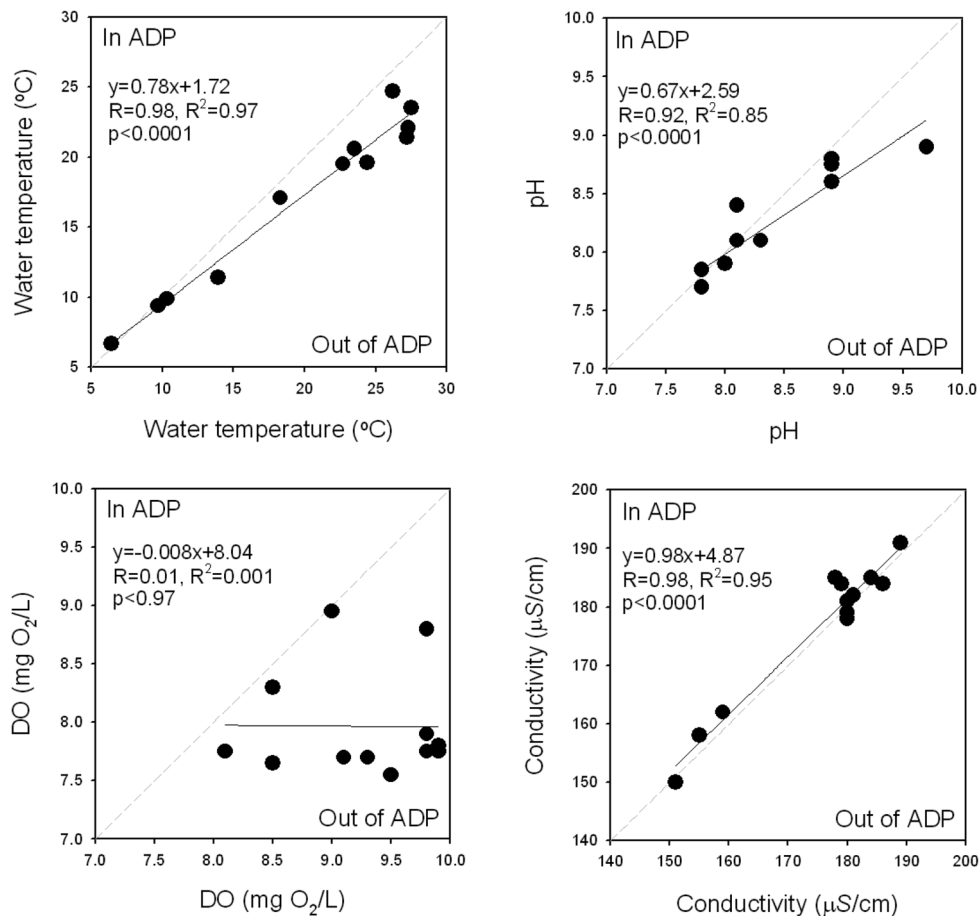


Fig. 5. Comparison results on inside and outside of basic water quality condition of ADP.

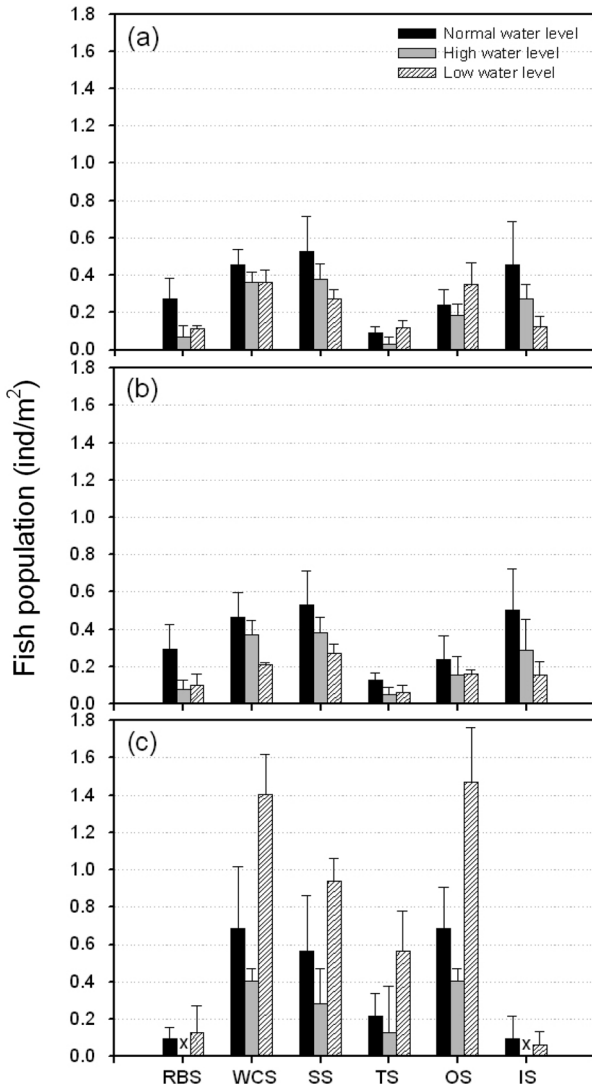


Fig. 6. Fish tolerance guild results per unit area according to water level changes in the different three habitat spaces. (a) Experimental pond, (b) Control pond, (c) ADP.

tolerance guild를 참조하여 분석하였다.

RBS는 일반적으로 평균기에 0.30 ind/m² 내외로 가장 높게 측정되었으나 고수위와 저수위에서는 0.20 ind/m² 이하로 낮아 전체적으로 모니터링 된 개체수가 매우 적었다. 이들은 주로 유수 지역의 하상에 서식하는 특징 때문에, 정수역인 실험연못에서 서식하기에는 다소 불리한 측면이 있다. 반면에 WCS는 ADP에서 높게 측정되었고, 특히 저수위에 1.40 ind/m²로 가장 높았다(Fig. 6(c)). 이는 ADP 내부로 WCS가 집어된 결과이며, 수위가 낮아질수록 뚜렷하게 나타났다.

SS과 TS의 결과는 어류가 수질오염이나 서식지 환경 변화에 취약한 정도를 가늠할 수 있다.³⁰⁾ SS는 실험구와 대조구가 서로 유사한 경향을 보였으나(0.27~0.56 ind/m²) (Fig. 6(a), (b)), 저수위 조건의 ADP에서는 0.94 ind/m²의 높은 값을 나타내었다. TS 역시 SS와 비슷한 경향을 보였으며, ADP에서 가장 높은 값을 나타내었다(0.56 ind/m²). 결국, SS, TS 모두 저수위 조건(<0.3 m)의 ADP에서 높은 어류 피난율을

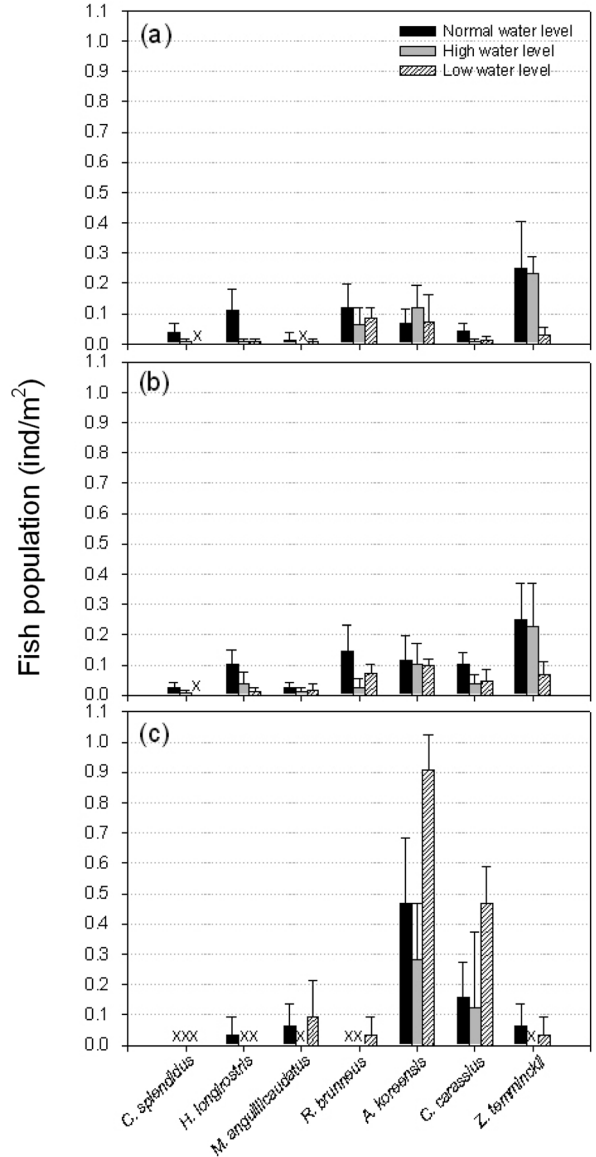


Fig. 7. Fish relative abundance results. (a) Experimental pond, (b) Control pond, (c) ADP.

보였으며, 실험구와 대조구보다 3.5~4.7배 높게 측정되었다.

OS는 실험구와 대조구에서 개체수 변동이 거의 없었지만, ADP에서는 수위가 낮아질수록 어류 개체수가 크게 증가하였다(최대 1.47 ind/m²). 일반적으로 OS는 TS와 함께 환경에 대한 적응력이 뛰어나며, 주로 정수역에 서식하는 종이 많다.³¹⁾

IS는 실험구와 대조구에서 높게 나타난 반면, ADP에서는 0.20 ind/m² 이하로 낮게 나타났다. 본 연구에서 활용된 IS (*Z. temminckii*)는 이동성이 높고 환경 변화에 민감한 종이므로,³²⁾ 유영에 제한을 받는 저수위 보다는 유량이 풍부한 고수위에 활동력이 강하게 나타난 것으로 사료된다.

3.4. Relative abundance

실험구와 대조구의 어류 우점도 분포는 서로 비슷한 경향

을 나타냈다. 실험구의 우점도는 *Z. temminckii* (18.9%) > *R. brunneus* (9.9%) > *A. koreensis* (9.7%) > *H. longirostris* (4.6%) > *C. carassius* (2.3%) > *C. splendidus* (1.6%) > *M. anguillicaudatus* (0.7%)였고, 대조구의 우점도는 *Z. temminckii* (12.9%) > *A. koreensis* (11.1%) > *R. brunneus* (7.1%) > *C. carassius* (5.7%) > *H. longirostris* (3.4%) > *M. anguillicaudatus* (1.7%) > *C. splendidus* (0.8%) 순서로 나타났다(Fig. 7(a), (b)). 실험구와 대조구에서 가장 높은 우점도를 보인 어류는 *Z. temminckii*였으며(2.05~2.18 ind/m²), 그 이외에 대부분의 어류는 서로 큰 차이 없이 분포하였다.

ADP 내부에서는 *A. koreensis*가 6.63 ind/m²로 우점하였고, 두 번째로 *C. carassius*가 3.00 ind/m²를 나타냈다. 우점도 비율은 *A. koreensis* (60.9%) > *C. carassius* (27.6%) > *M. anguillicaudatus* (5.7%) > *Z. temminckii* (3.4%) > *H. longirostris* (1.1%), *R. brunneus* (1.1%) > *C. splendidus* (0.0%) 순으로 나타났다(Fig. 7(c)).

ADP와 실험구, 대조구간의 종풍부도는 뚜렷한 차이가 있었다. ADP는 *A. koreensis*, *C. carassius*와 같은 WCS가 88.5%로 높게 나타낸 반면, 실험구와 대조구에서는 각각 25.1%, 39.2%로 낮았다. 하지만 실험구와 대조구에서는 IS인 *Z. temminckii*가 각각 18.9%, 12.9%로 우점한 반면, ADP에서는 3.4%로 저조하였다. 본 결과를 미루어 볼 때, *A. koreensis*와 같은 WCS는 생활환경이 비교적 일정하고 수심이 확보된 안정적인 환경을 선호하는 경향이 있기 때문에,^{33,34} 행동반경이 비교적 넓은 *Z. temminckii* 보다^{32,35} ADP와 같은 정수역 서식처에 적합한 어종이라고 사료된다.

3.5. Correlation analysis

ADP와 대조구 연못을 대상으로 세 가지 변수(fish tolerance guild, 수위, 단위면적당 어류 개체수)에 대한 상관관계 분석을 실시하였다(Fig. 8). Axis 1은 수위와 fish tolerance guild의 상관관계를 나타낸다. Axis 1의 경우 전체적으로 수위가 하락할수록 fish tolerance guild가 감소하는 음의 상관관계를 나타내었다. ADP는 OS, WCS, SS, TS가 수위와 보통~강한 상관관계의 범위(-0.54~-0.78)를 나타내었지만, 대조구는 동일한 항목에서 -0.03~-0.60을 나타내어 상대적으로 상관관계가 낮음을 알 수 있다.³⁶ ADP에서 Axis 1이 밀접한 관계를 보인 이유는, 수위가 낮아짐에 따라 어류가 수심이 확보된 ADP 내부로 피난한 결과로 사료된다. 반면에 대조구의 어류는 낮은 수위가 조성될 시 적절한 피난처가 없기 때문에 수위변화에 취약한 결과를 나타내었다.

Axis 2는 채집된 총 어류 개체수와 fish tolerance guild의 상관관계를 나타내었다. ADP에서 OS, WCS, SS, TS 등이 높은 상관관계($R = 0.80\sim 0.99$, $p < 0.05$)를 보였으나, RBS, IS는 상관도가 낮고 유의하지 않았다($R = 0.47\sim 0.28$). 대조구에서는 SS, WCS, RBS, IS가 높은 상관관계를 보였고($R = 0.86\sim 0.92$, $p < 0.05$), ADP보다 RBS, IS의 비중이 높은 점이 서로 달랐다. 즉, ADP에서는 잡식종, 수층종, 민감종, 내성종

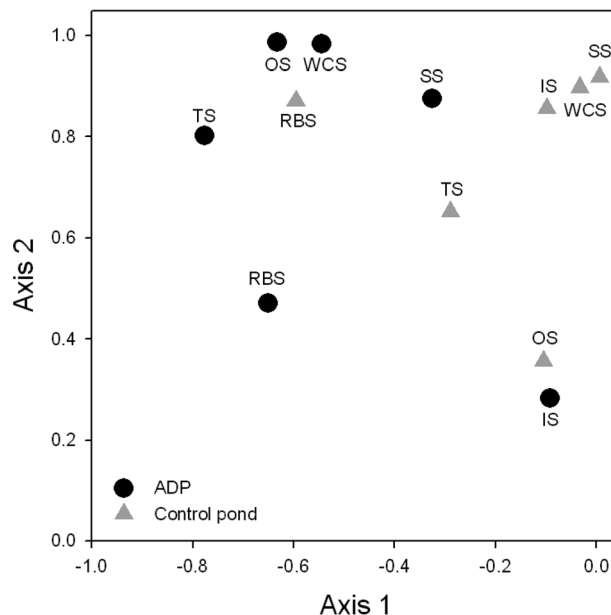


Fig. 8. Correlation analysis between ADP and control pond about fish tolerance guild, water level and fish population per unit area, Axis 1 is correlation of water level and fish tolerance guild, and Axis 2 is correlation of total fish population and fish tolerance guild.

의 특징을 가진 어류가 유리하게 서식하는 반면, RBS 또는 IS는 상대적으로 적합하지 않다고 여겨진다.

4. Discussion

본 연구결과에서 나타났듯이, 어류는 수위 변동의 영향을 크게 받으며, 수위가 감소하면 깊은 피난처로 이동하기도 한다. 특히 갈수기에는 수중 생물서식처가 공기 중에 노출되거나 훼손되는 경우가 많으므로 이 시기의 어류는 보다 깊은 서식처를 선호하는 경향이 있다.^{15,16} 이와 유사한 선행연구는 *Hemibarbus labeo*가 저수위시에 웅덩이가 발달한 깊은 수심으로 이동하는 특성을 나타내거나,³⁷ 갈수기에 어류가 군집을 형성하여 깊은 서식처로 이동하는 사례 등이 있다.³⁸

갈수기가 지속되면 수면적과 수체 부피가 감소하여 수질이 악화되는 등 물리적 또는 이화학적 인자의 변화를 일으키기 쉽다.^{39,40} 이러한 조건들은 수생태계의 다양한 상호작용과 관련되며, 잠재적으로는 어류의 산란율(spawning rate)과 사망률에 영향을 주기 때문에, 어류는 본능적으로 군집의 지속성을 위해 외부 교란을 회피하고자 한다.⁴¹ 또한, 갈수기에는 어류가 외부 포식자나 천적들에게 쉽게 노출되어 개체수 감소에 직접적인 영향을 줄 수 있다.⁶ 본 연구에서 현장조사 결과, 대조구와 실험구의 일부 구간에서 굴곡진 하상의 장애물과 수초로 인해 어류의 유영이 제한됨을 발견할 수 있었다. 하지만, ADP에서는 어류의 높은 개체 밀도를 나타내었으며, 그 이유는 내부에 자체 수위를 항상 유지

하고 있기 때문에 판단된다. 그러한 이유로 ADP 내부는 어류의 자연스런 유영공간이 확보되었고, 수온이 안정적이며, 상부 덮개가 외부 천적들의 접근을 차단한, 복합적인 기능을 가지는 공간으로 사료된다.

5. Conclusions

본 연구는 지하 매립형 구조물인 인공 돛병(ADP)을 시공하여 어류의 피난처로서의 기능을 정량적으로 평가하고 그 특징을 파악하고자 하였다.

1) 수위 변화에 따른 단위면적당 어류 개체수는 0.2 m 이하의 저수위의 ADP에서 집어 효과가 뚜렷하게 나타나 어류 피난처로서의 순기능을 확인하였다. 대조구와 실험구에서 나타난 실험어류의 최적 수위는 약 0.5 m였으나, ADP는 수위가 낮아질수록 어류의 총 개체수가 증가하는 강한 음의 상관관계를 나타내어, 수위 하락에 따른 어류 이동성을 뒷받침하였다.

2) ADP 내부는 외부보다 평균적으로 수온 2.6°C, DO 1.3 mg O₂/L가 낮게 측정되었지만 대부분의 기초수질이 비교적 일정한 수준으로 유지되어 실험어류가 서식하는데 큰 제한 요소는 없었다. ADP 내·외부에서 수질에 대한 상관관계 분석결과 수온, pH, 전기전도도가 높은 상관관계를 보여 내·외부간의 수질차이가 크지 않음을 시사하였다.

3) fish tolerance guild로 분석한 ADP 내부 평가는 SS, TS 등이 풍부하게 출현하였으며 특히 WCS와 OS가 높게 나타났다. 또한, 대부분의 인자들이 저수위시 높게 측정된 점이 특징적이며, 이는 ADP 내부가 정수역(lentic system)에 서식하는 어종이 적합함을 나타내었다.

4) 실험 어류의 누적 개체수로 평가한 종풍부도 분석은 ADP와 그 이외의 공간으로 확연히 다른 결과를 나타내었다. ADP에서는 수심이 깊고 안정적인 공간을 선호하는 *A. koreensis*, *C. carassius*가 88.5%로 높게 나타난 반면, 실험구와 대조구에서는 *Z. temminckii*가 각각 18.9%, 12.9%로 우점하였다. 본 결과를 미루어 볼 때 어류 특성에 따라 선호하는 환경이 서로 다를 수 있으며, 향후 ADP의 현장 적용 시 목표종 복원의 선정에 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

5) ADP와 대조구 연못을 대상으로 상관관계 분석 결과, ADP는 수위와 TS, RBS, OS, WCS가 강한 음의 상관관계를 나타내었으나, 대조구는 수위와 큰 상관관계가 없었다. 총 어류 개체수와 fish tolerance guild의 상관관계는 ADP에서 OS, WCS, SS, TS가 높은 반면, 대조구에서는 SS, WCS, RBS, IS가 높은 값을 보였다. 즉, ADP는 수위 하락에 따라 어류의 피난효과가 강하게 나타났으며, OS, WCS, SS, TS 등의 어류 guild가 높은 비중을 차지했다.

사 사

This research was supported by a grant from River Restoration Program for Developing Coexistence between Nature and Human (Green River) (12technological innovationC02) and Management Plan for the Water Environment of the Detention Reservoir in the Seokmun Industrial Complex funded by the Korea Institute of Construction Technology and Korea Land & Housing Corporation, respectively.

KSEE

참고문헌

- Poff, N. L., "Why disturbances can be predictable: a perspective on the definition of disturbance in streams," *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **11**, 86~92(1992).
- Giller, P. S., "Floods and droughts: the effects of variations in water flow on streams and rivers. In: Disturbance and recovery of ecological systems," Royal Irish Academy, Dublin, Ireland, pp. 1~19(1996).
- Fisher S. G., Gray, L. J., Grimm, N. B. and Busch, D. E., "The temporal succession in a desert stream following flooding," *Ecol. Monog.*, **52**, 93~110(1982).
- Poff, N. L. and Allan, J. D. "Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability," *Ecology*, **76**, 606~627(1995).
- Magoulick, D. D., "Spatial and temporal variation in fish assemblages of drying stream pools: the role of abiotic and biotic factors," *Aquat. Ecol.*, **34**, 29~41(2000).
- Daniel, D., Magoulick, D. and Robert, M. K., "The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis," *Freshw. Biology*, **48**, 1186~1198(2003).
- Schlosser, I. J. and Angermeier, P. L., "Spatial variation in demographic processes of lotic fishes: conceptual models, empirical evidence, and implications for conservation," *Am. Fisheries Soc. Symposium*, **17**, 392~401(1995).
- Ministry of Environment of Republic of Korea, "Guidelines for river restoration," Ministry of Environment of Republic of Korea, pp. 1~21, (2002).
- Korea Water Resources Corporation, "Water Science," Korea Water Resources Corporation, pp. 1~55(1991).
- Regier, H. A. and Meisner, J. D. "Anticipated effects of climate change on freshwater fishes and their habitat," *Fisheries*, **15**(6), 10~15(1990).
- Scott, D. B., Tracy, D. H., Sean, T. L. and Walter, G. D., "The influence of changing water levels and temperatures on the food habits of walleye in lake Oahe, South Dakota," *J. Freshw. Ecol.*, **10**(1), 179~189(1995).
- Mohseni, O., Stefan, H. G. and Eaton, J. G., "Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams," *Climate Change*, **59**(3), 389~409(2003).
- Donaldson, M. R., Cooke, S. J., Patterson, D. A. and Macdonald, J. S., "Cold shock and fish," *J. Fish Biol.*, **73**, 1491~

- 1530(2008).
14. Alexander, N., Graham, D. Raby, C. T. and Hasler, M. K. Taylor, S. J. C., "Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation," *J. Environ. Manage.*, **103**, 133~141(2012).
 15. Townsend, C. R., "The patch dynamics concept of stream community ecology," *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **8**, 36~40(1989).
 16. Arrington, D. A., Winemiller, K. O. and Layman, C. A., "Community assembly at the patch scale in a species-rich tropical river," *Oecologia.*, **144**, 157~67(2005).
 17. Kim, J. O., Shin, H. S., Yoo, J. H., Lee, S. H., Jang, K. S. and Kim, B. C., "Functional evaluation of small-scale pond at paddy field as a shelter for mudfish during midsummer drainage period," *Kor. J. Environ. Agric.*, **30**(1), 37~42(2011).
 18. Cowardin, L. M., Carter, V. and LaRoe, E. T., "Classification of wetlands and deepwater habitats of the united states," U.S. Department of the Interior Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services(1979).
 19. Kusuda, S. and Noboru, K., "Upstream-migrating loach in the fishway for a rice paddy," *Fish Water*, **45**, 19~22(2009).
 20. Harding, J. S., Norton, D. A. and McIntosh, A. R., "Persistence of a significant population of rare Canterbury mudfish (*Neochanna burrowsius*) in a hydrologically isolated catchment," *New Zeal. J. Mar. Fresh.*, **41**, 309~316(2007).
 21. OhioEPA. Methods for assessing habitat in flowing waters: using the qualitative habitat evaluation index (QHEI)(2006).
 22. An, K-G., Lee, J. Y., Bae, D. Y., Kim, J. H., Hwang, S. J., Kwon, D. H., Lee, J. G. and Kim, C. S., "Ecological Assessments of Aquatic Environment using Multi-metric Model in Major Nationwide Stream Watersheds," *Kor. Soc. Water Qual.*, **22**(5), 796~804(2006).
 23. Gabelhouse, J. D. W., "Alength-categorization system to assess fish stocks," *N. Am. J. Fish. Manage.*, **4**, 273~285(1984).
 24. John, W. H., "Comparison between a fine mesh trap net and five other fishing gears for sampling shallow-lake fish communities in New Zealand (Note)," *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.*, **23**, 321~324(1989).
 25. Kevin, L. P., Gene, R. W. and Daryl, L. B., "Maximum size of fish caught with standard gears and recreational angling," *Fisheries Res.*, **76**, 117~122(2005).
 26. Korea Water Resources Corporation, "Development and application of determine for instream flow," *Kor. Water Res. Corp.*, (1995).
 27. Kramer, D. L. "Dissolved oxygen and fish behavior," *Environ. Biol. Fishes.*, **18**(2), 81~92(1987).
 28. Karr, J. R., "Assessment of biotic integrity using fish communities," *Fisheries*, **6**, 21~27(1981).
 29. An, K.-G., Park, S. S. and Shin, Y. Y., "An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions," *Environ. Int.*, **28**(5), 411~420(2002).
 30. An, K.-G., Jung, S. H. and Choi, S. S., "An evaluation on health conditions of Pyong-chang River using the index of biological integrity (IBI) and qualitative habitat evaluation index (QHEI)," *Kor. J. Limnol.*, **34**(3), 153~165(2001).
 31. U. S. EPA. "Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters," EPA600-R-92-111 (1993).
 32. Seo, J. W., "Fish fauna and ecological characteristics of dark chub (*Zacco temminckii*) population in the mid-upper region of Gam Stream," *Kor. J. Limnol.*, **38**(2), 196~206(2005).
 33. Kim, C. H., Lee, W. O., Lee, J. H. and Baek, J. M., "Reproduction study of Korean endemic species *Acheilognathus korensis*," *Kor. J. Ichthyol.*, **23**(2) 150~157(2011).
 34. Kim, H. S. and Kim, I. S., "Population ecology of deep body bitterling, *Acheilognathus macropterus* (Pisces: Cyprinidae) in the Bulgapcheon Stream," *Kor. J. Ichthyol.*, **24**(1), 27~34 (2012).
 35. Chun, S. L., "About the distribution of *Zacco temminckii* and Morocco oxycephalus in Jiri mountain stream," *Kor. J. Limnol.*, **22**(2) 150(1986).
 36. Liu, C. W., Lin, K. H. and Kuo, Y.N., "Appication of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black-poot disease area in Taiwan," *Sci. Tot. Environ.*, **313**, 77~89(2003).
 37. Kim, J. D., Yang, H., Cho, Y. C., Kim, Y. C. and Cho, M. Y., "Monitoring of pathogens and characteristics of fish community in the Taewha River," *Kor. J. Environ. Biol.*, **28** (3), 143~149(2010).
 38. Layman, C. A., Montana, C. G. and Allgeier, J. E., "Linking fish colonization rates and water level change in littoral habitats of a Venezuelan floodplain river," *Aquat. Ecol.*, **44**, 269~273(2010).
 39. Resh, V. H., Brown, A. V., Covich, A. P., Gurtz, M. E., LiH, W., Minshall, G. W., Reice, S. R., Sheldon, A. L., Wallace, J. B. and Wissmar, R. "The role of disturbance in stream ecology," *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **7**, 433~455(1988).
 40. Lake, P. S. "Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters," *Freshwater Biol.*, **48**, 1161~1172(2003).
 41. Andrew, J. H. D. and Daved, J. K., "Fish community responses to drying disturbances in an intermittent stream: a landscape perspective," *Freshwater Biol.*, **52**, 1719~1733(2007).