얕은 연못에서 담수 어류의 열성 스트레스 저감을 위한 피난처 개발 및 수질환경 조사 연구

A Study on Development of Freshwater Fish Shelter and Evaluation of Water Quality for the Reduction of Thermal Stress in Shallow Pond

이새로미 · 안창혁 · 주진철* · 송호면 · 박재로[†]

Saeromi Lee · Chang Hyuk Ahn · Jin Chul Joo* · Ho Myeon Song · Jae Roh Park[†]

한국건설기술연구원 환경연구실 · *한밭대학교 건설환경공학과

Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Department of Civil & Environmental Engineering

(Received December 8, 2014; Revised December 17, 2014; Accepted December 22, 2014)

Abstract : The purpose of this study evaluates the water quality of artificial deep pool (ADP) during the late spring and summer. we monitored the water quality, as pH, dissolved oxygen (DO), temperature and conductivity at two stations (St. 1. open water, St. 2. in the ADP). The water quality in the ADP is very stable, and temperature and DO are lower than the open water (average value; temperature 1.4~3.2°C, DO 2.4~3.6 mg/L). In particular, daily variation of temperature in the open water showed above 4°C, but ADP remained stable. The water quality was analyzed using two-way analysis of variance (ANOVA). The results of the analysis showed difference about temperature, pH, DO, conductivity (two-way ANOVA, $p<0.05$). The ADP has created an aqua environment in thermal and DO gradients by depth. About 1.2 m, Temperature and DO were sharply decreased. The *Rhodeus uyekii* is dominant species in pond of this study. The ADP offers optimum water temperature (16.5~18.5°C) to the *Rhodeus uyekii* about spawning. Consequently, the ADP offers stable habitat than open water for fish and aquatic organisms during the summer. It is also a good shelter for fish from a thermal stress.

Key Words : Artificial Deep Pool (ADP), Water Temperature Fluctuation, Daily Variation, Thermal Stress on Fish

요약 : 본 연구는 얕은 연못에 시공된 지하 매립형 어류 피난처 구조물인 artificial deep pool (ADP)을 대상으로 늦봄~여름 기간 동안 수질환경을 평가하고 그 특징을 파악하고자 하였다. 개방수역인 St. 1과 ADP인 St. 2로 구분하여 분석한 결과, St. 2는 St. 1보다 평균적으로 수온 1.4~3.2°C, DO 2.4~3.6 mg/L 낮았고 일수질변동(daily water quality fluctuation)이 적은 안정된 공간으로 나타났다. 특히 수온의 일변화(daily variations)는 St. 1에서 $\geq 4^\circ\text{C}$ 을 보였으나, St. 2에서는 거의 변화가 없었기 때문에 고수온이 지속될 때 어류가 피난 공간으로 활용할 수 있음을 시사하였다. 이화학적 수질은 St. 1과 St. 2에서 큰 차이가 없었지만, 수온, pH, DO, 전기전도도에 대해서는 서로 뚜렷하게 다른 공간임을 나타내었다(two-way ANOVA, $P<0.05$). ADP 내부는 수심별로 thermal and DO gradient가 나타났으며, 수심 약 1.2 m 이후부터 급격히 감소하였다. 이러한 수질환경은 얕은 연못에서 어류의 서식 및 산란에 영향을 미치며, 본 연구의 조사지점의 연못에서는 각시붕어(*Rhodeus uyekii*)가 우점하는 것으로 보아, ADP가 적용되면서 납자루아과인 각시붕어의 적정 산란수온(16.5~18.5°C)을 제공하여 각시붕어가 서식하기 좋은 환경을 조성한 것으로 판단된다. 또한, ADP는 여름철에 수온이 높고, 변동이 큰 외부환경보다 낮은 수온을 일정하게 유지하여 수온변동 및 고온에 민감한 어종에게 좋은 피난처로 활용될 것으로 여겨진다.

주제어 : 방틀둑병, 수온변동, 수환경 일변동, 열성 스트레스

1. Introduction

어류는 살아가면서 많은 스트레스와 직면하게 된다.¹⁾ 어류는 평생 물속에서 살아가기 때문에 수중 환경은 생존에 가장 직접적인 제한요소이다.^{2,3)} 특히 수온, pH, DO와 같은 인자는 어류의 생리학적 변화에 큰 영향을 줄 수 있으며, 종별로 적정범위가 조금씩 다르다.⁴⁻⁶⁾

연안대(littoral zone)는 땅과 물이 접하는 지점부터 얕은 수심의 구간을 포괄적으로 지칭한다.⁷⁾ 연안대는 수심이 얕아 유광층에 해당되기 때문에 광에너지가 풍부하다.⁸⁾ 그러므로 연안대는 식물과 어류가 높은 밀도로 서식하기에 충분한 장소이며,⁹⁾ 식물의 광합성과 호흡작용으로 인해 pH,

DO와 같은 수질 인자에 영향을 주게 된다.⁹⁾ Durigan¹⁰⁾의 연구결과에 의하면 DO는 조류의 양과 비례관계를 나타내는데, 이는 광합성이 주요 원인이라고 보고하였다. 일반적으로 얕은 연못도 연안대에 포함되며, 부영양하고 어류의 밀도가 높은 조건에서는 TP 농도가 높기 때문에 광합성 순환에 더욱 큰 영향을 줄 수 있다.¹⁰⁾

수온은 어류에게 민감한 또 다른 중요한 인자이다.^{6,11)} 특히 여름철에 수온이 높은 상태에서 일 변동(daily fluctuations)이 심하게 나타나게 되면 어류에게 큰 스트레스를 줄 수 있다.¹²⁾ 수온차의 원인은 기온, 수체의 크기, 유량, 혼합의 정도, 태양광에 노출된 정도 등이 있다. 만약 수온이 지나치게 높거나 수온 변동이 크게 되면 열성 스트레스(ther-

[†] Corresponding author E-mail: jrpark@kict.re.kr Tel: 031-910-0302 Fax: 031-910-0291

mal stress)가 발생하고, 이는 어류에게 누적되어 영향을 준다. 따라서 어류는 수온이 높아지면 스트레스를 받고, 높은 수온이 사라질 때 스트레스가 회복되는 주기를 반복한다.¹³⁾ 그러므로 어류는 누적된 thermal stress를 해소하기 위해 다양한 생존 전략이 필요하게 된다. 만약 피난처가 없는 상태에서 수온이 상승하면 어류의 생식과 성장에 영향을 줄 수 있으며, 세계적으로 지구온난화에 따라 약 24%의 어류가 멸종 위기에 있다는 보고가 있다.¹⁴⁾

어류 피난처와 관한 연구는 과거부터 꾸준히 진행되고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 어류 피난처는 포식자와의 조우(encounter)를 사전에 차단하거나,^{18,19)} 홍수나 가뭄과 같은 물리적 장애를 대비하고, 궁극적으로 대상 어종의 생존률을 높여 개체수를 유지하거나 증가시키기 위해 활용하고 있다.²⁰⁾ 하지만 대부분의 연구가 구조적 복잡성을 강조하여 포식 확률을 낮춘 방법이며,²¹⁾ 물리적 장애나 thermal stress 등에 대한 대비는 미흡한 실정이다.

본 연구에서 개발한 방틀생태둠벙(artificial deep pool, ADP)은 담수생태계에서 수위가 낮아질 때 어류의 피난 공간을 확보한 지하매립형 구조물이다.²¹⁾ 기본적인 구조는 직육면체이며, 덮개와 본체로 크게 구분된다. ADP의 덮개는 타공(지름 0.2 m)과 측면공간(높이 0.2 m)이 있으며, 이는 사람의 실족에 의한 상해를 방지하고 어류의 직접적인 이동

통로를 확보하기 위함이다. 본체는 어류가 피난할 수 있는 공간이며, 적용대상지에 충분한 크기의 ADP가 설치된다면 갈수기에 어류가 효율적으로 이용할 수 있다. 또한, ADP는 갈수기뿐만 아니라, 평수기에도 어류의 피난 및 은신공간으로 활용이 가능하다. 본 연구에서는 어류의 thermal stress가 상승할 수 있는 늦봄~여름 기간 동안 ADP를 수질 측면에서 어류 피난처기능을 분석하고, 향후 설계인자로 활용할 수 있는 기초 자료를 확보하고자 하였다.

2. Materials and methods

2.1. Study site

본 연구는 경기도 고양시 일산서구 대화동에 위치한 한국건설기술연구원의 생태연못에서 실시하였다. 연못은 면적 110 m², 평균수심 0.5 m, 최대수심 0.7 m이며, 하상재료는 자갈(gravel) (diameter ≤ 60 mm)과 모래(diameter ≤ 2 mm), 바닥은 bentonite로 차수되어 있다. 연못의 유지용수는 상수와 빗물을 저류하여 활용하고 있으며, 수위조절 센서를 유입구에 설치하여 건기나 강우 시에도 일정 수위를 유지하도록 하였다.

어류 피난처인 ADP의 제원은 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 높

Fig. 1. Conceptual view of the study site, Y-axis is water level and x-axis show non-scale.

Fig. 2. Installation of ADP in pond of KICT. (a) Overall view of pond and installed ADP in study site. St. 1 is open space habitat and St. 2 is underground space habitat (b) View of cover of the ADP in pond of KICT. Cover of the ADP is covered with basalt.

이 1.5 m이며, zero-cement concrete로 제작하여 연못 중앙의 가장 깊은 곳(수심 0.7 m 지점)에 설치하였다. ADP의 내부는 어류가 피신할 수 있는 공간이 있고, 상부에 타공(diameter 0.2 m)과 측면공간(height 0.2 m)이 있는 덮개(cover)를 덮어 어류의 피난을 유도하였다. 또한 덮개 위에는 현무암(basalt) (diameter ≤ 250 mm)을 설치하여 구조물의 자연스러움을 강조하였다(Fig. 1).

연못의 생물상은 수생식물인 노랑어리연꽃(*Nymphaoides peltata*)이 수체 중심에 분포하고 있으며(Fig. 2), 어류는 우점종인 각시붕어(*Rhodeus uyekii*)를 비롯하여 정수생태계(lentic ecosystem)에 주로 출현하는 다양한 종이 서식하고 있다.

2.2. Installation and sampling

연못의 개방수역(open space)을 St. 1, ADP가 있는 지하공간을 St. 2로 각각 지정하였다(Fig. 2). 각각의 지점에는 수질측정센서(XLM6000, YSI, USA)를 설치하여 2012년 5월 21일~7월 25일(66일) 동안 1시간 단위로 측정하였다. 수질측정센서는 St. 1은 수심 0.4 m, St. 2는 수심 1.5 m 지점에 설치되었으며, 측정된 항목은 수온, pH, DO, 전기전도도이다. 측정된 자료는 크게 normal season, rainy season으로 구분하여 시간순서로 정리하였다. 그리고 St. 1과 St. 2의 수질 특징을 비교하기 위해 수온, pH, DO의 일변화(daily fluctuation)를 분석하였다. ADP 내부의 수심별 자료는 현장용 기기(550A, YSI, USA; 63, YSI, USA)를 활용하였으며, 측정된 항목은 수온, pH, DO, 전기전도도이다.

이화학적 수질은 Van Dorn sampler를 활용하여 샘플링

하였으며, 2 L polyethylene병에 채취하여 실험실로 운반 후 standard method에 따라 분석하였다.²²⁾ 분석항목은 탁도, SS, TOC, DOC, BOD, COD, TN, NH₃, NO₃⁻, TP, PO₄³⁻, Chl-*a*이다. 강우자료는 항공기상청 김포기상대(Korea Aviation Meteorological Agency) 자료를 활용하였다.

2.3. Statistical analysis

실험 data는 이원배치 분산분석(two-way ANOVA)을 활용하여 St. 1, 2의 수질인자에 대해 유의성과 상호작용(interaction)을 분석하였다. two-way ANOVA는 다수의 관찰값(factor)을 대상으로 측정값을 평균 비교하는 방법으로 다양한 분야에서 널리 활용하고 있다.^{3,23)}

3. Results

3.1. Water quality result of St. 1 and St. 2

전체기간 동안 동일한 수체에서 개방수역(St. 1)과 ADP(St. 2)의 수질을 분석한 결과, 계절별, 수질 항목별로 유의한 차이를 나타내었다($P < 0.05$). 평수기에는 St. 1에서 수온 $22.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$, pH 7.6 ± 0.3 , DO 8.5 ± 0.8 mg/L, 전기전도도 196 ± 13 $\mu\text{S/cm}$ 이었지만, 반면에 St. 2에서는 수온 $18.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$, pH 7.4 ± 0.1 , DO 4.9 ± 0.3 mg/L, 전기전도도 219 ± 4 $\mu\text{S/cm}$ 를 나타내었다(Table 1). 전반적으로 St. 2에서 수온과 DO가 낮았으며, 이는 ADP의 shading effect로 여겨진다.

강우시에는 평수기와 비교하여 지점별로 차이가 작았다. St. 1에서 수온 $25.1 \pm 1.7^\circ\text{C}$, pH 7.4 ± 0.2 , DO 8.3 ± 1.8 mg/L,

Table 1. Result of water quality parameters during normal and rainy season (N=4)

Description	Normal season						Rainy season					
	St. 1			St. 2			St. 1			St. 2		
	mean $\pm$ S,D	max.	min.	mean $\pm$ S,D	max.	min.	mean $\pm$ S,D	max.	min.	mean $\pm$ S,D	max.	min.
Temperature ($^\circ\text{C}$)*	22.0 ± 1.5	26.4	19.3	18.8 ± 0.5	19.8	17.9	25.1 ± 1.7	30.1	21.7	23.7 ± 1.0	26.1	21.6
pH*	7.6 ± 0.3	8.5	7.2	7.4 ± 0.1	7.6	7.2	7.4 ± 0.2	8.2	7.0	7.3 ± 0.1	7.7	7.1
DO (mg/L)*	8.5 ± 0.8	10.1	6.0	4.9 ± 0.3	6.4	4.1	8.3 ± 1.8	13.4	4.8	5.9 ± 1.3	10.3	3.9
Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)*	196 ± 13	211	187	219 ± 4	226	208	133 ± 30	217	62	134 ± 9	153	117
Turbidity (NTU)**	8.8 ± 2.8	12.0	6.5	7.3 ± 1.2	8.3	6.0	6.0 ± 0.2	6.2	5.8	6.5 ± 0.6	7.2	6.1
SS (mg/L)**	9.4 ± 1.9	11.5	7.8	5.1 ± 0.7	5.8	4.5	8.1 ± 0.3	8.4	7.8	8.3 ± 0.4	8.7	7.9
TOC (mg/L)**	1.77 ± 0.14	1.79	1.73	1.75 ± 0.14	1.78	1.73	2.04 ± 0.22	2.42	1.75	1.99 ± 0.15	2.28	1.81
DOC (mg/L)**	1.69 ± 0.15	1.74	1.61	1.71 ± 0.15	1.75	1.67	1.85 ± 0.11	2.05	1.69	1.91 ± 0.18	2.25	1.71
BOD (mg/L)**	3.1 ± 0.5	3.5	2.6	3.1 ± 0.3	3.3	2.8	3.3 ± 0.2	3.5	3.2	3.1 ± 0.2	3.3	3.0
COD (mg/L)**	2.8 ± 0.3	3.1	2.4	2.8 ± 0.3	3.1	2.3	2.6 ± 0.2	2.9	2.4	2.7 ± 0.1	2.9	2.5
TN (mg/L)**	1.2 ± 0.1	1.3	1.1	1.2 ± 0.1	1.3	1.1	1.3 ± 0.1	1.4	1.2	1.3 ± 0.1	1.4	1.2
NH ₃ ($\mu\text{g/L}$)**	159 ± 7	166	152	167 ± 10	178	158	160 ± 10	170	150	170 ± 13	182	156
NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g/L}$)**	$1,043 \pm 25$	1,070	1,020	$1,039 \pm 22$	1,063	1,021	$1,033 \pm 21$	1,050	1,010	$1,034 \pm 14$	1,048	1,021
TP ($\mu\text{g/L}$)**	36 ± 3	40	34	40 ± 5	45	36	42 ± 4	47	39	43 ± 2	45	42
PO ₄ ³⁻ ($\mu\text{g/L}$)**	22 ± 3	25	19	24 ± 4	29	21	16 ± 2	18	14	18 ± 4	21	14
Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)**	8.5 ± 1.1	9.6	7.5	1.1 ± 0.4	1.5	0.8	13.5 ± 1.2	14.7	12.4	0.7 ± 0.6	1.2	N/D

* Water quality monitoring device, ** Laboratory analysis

전기전도도 $133 \pm 30 \mu\text{S/cm}$ 이었지만, 반면에 St. 2에서는 수온 $23.7 \pm 1.0^\circ\text{C}$, pH 7.3 ± 0.1 , DO $5.9 \pm 1.3 \text{ mg/L}$, 전기전도도 $134 \pm 9 \mu\text{S/cm}$ 를 나타내었다(Table 1). 본 연구대상지의 수체가 약 55 m^3 로 작으며, 지점 간 거리가 멀지 않은 점을 감안하면, 강우에 의한 수체의 혼합이 주요 원인으로 여겨진다. 수체의 혼합의 증거로는 첫째, 강우 시에 수온과 DO가 두 지점에서 서로 동일한 수준을 보였고, 둘째, 전기전도도

가 다량의 강우 유입 후 희석되어 급격히 낮아지는 현상으로 추정할 수 있다.

실험실에서 분석한 유기물, 무기물 항목들은 지점별로 유의한 차이가 없었다. 하지만 계절별로 분석한 결과, 유기물 항목은 강우시에 약간 증가하는 경향을 보였다. St. 1에서 평수기에는 TOC $1.77 \pm 0.14 \text{ mg/L}$, DOC $1.69 \pm 0.15 \text{ mg/L}$ 를 보였으며, 강우시는 TOC $2.04 \pm 0.22 \text{ mg/L}$, DOC 1.85 ± 0.11

Fig. 3. Variations of water temperature, pH, DO and conductivity of St. 1 and St. 2 during normal and rainy season.

mg/L을 나타내었다. 하지만 St. 2에서는 평수기에 TOC 1.75 ± 0.14 mg/L, DOC 1.71 ± 0.15 mg/L를 나타내었고, 강우시에는 TOC 1.99 ± 0.15 mg/L, DOC 1.91 ± 0.18 mg/L로 약간 증가하였다. TOC와 DOC는 수중생태계 건강성 유지를 위한 중요한 유기물 인자이며,²⁴⁾ 이들 물질이 강우 시에 증가한 이유는 강우유출수가 유입되거나, 수체의 흔들림으로 인해 저층 물질이 부유했을 것으로 사료된다.

N, P와 같은 영양염류들은 St. 1 보다 St. 2에서 조금 높은 경향을 보였다. St. 2는 개방수역인 St. 1보다 빛이 상당 부분 차단되기 때문에 광합성보다 호흡과 분해작용이 더 크게 나타났을 것이다. 그 결과로 광합성 지표인 Chl-*a*는 St. 1에서 $8.5 \sim 10.4$ $\mu\text{g/L}$ 를 나타내었으나, St. 2에서는 $0.7 \sim 1.1$ $\mu\text{g/L}$ 로 차이를 보였다.

St. 1과 St. 2는 수질의 일주기 변동에서 다른 양상을 보였다. 특히, 기상과 밀접한 영향이 있는 항목인 수온, pH, DO는 지점별로 뚜렷한 차이가 나타났다($P < 0.05$) (Fig. 3). 수질의 일주기 변동은 St. 1이 St. 2 보다 변동이 심하게 나

타났으며, 강우기보다 평수기에서 일 변동이 크게 나타났다. 평수기에 St. 1에서 최대값과 최소값의 차이는 수온 7.1°C , pH 1.3, DO 4.1 mg/L이었으나, St. 2에서는 수온 1.9°C , pH 0.4, DO 2.3 mg/L를 나타내었다. 반면에 강우기에는 St. 1에서 최대값과 최소값의 차이는 수온 8.4°C , pH 1.2, DO 8.6 mg/L이었으나, St. 2에서는 수온 4.5°C , pH 0.6, DO 6.4 mg/L를 나타내었다. 즉, 수체의 움직임이 없고 광합성이 활발한 조건에서 공간적, 계절적 수질 차이가 크게 나타남을 알 수 있었다.

3.2. Daily variations

수온, pH, DO에 대한 일변화는 불균형 주기(unbalanced cycle)를 나타내었다. 특히 two-way ANOVA 분석 결과, St. 1과 St. 2는 서로 뚜렷하게 다른 패턴을 보여주었다($P < 0.05$). 계절적으로는 평수기와 강우기가 서로 유사한 경향을 보였으나 측정값의 표준편차는 강우기에 크게 나타났다.

St. 1에서 수온, pH, DO는 시간대별로 값의 변동이 크게

Fig. 4. Daily variations of water temperature, pH, DO and DO saturation during the normal season (1) and rainy season (2) at St. 1 and St. 2 in study site.

나타났다. 특히 pH와 DO는 식물플랑크톤의 광합성에 따라 낮 동안에 증가하는 전형적인 현상을 보였다. pH, DO의 변화는 호수나 연못에서 일광합성산물(daily photosynthesis products)의 결과이며, 이는 식물플랑크톤 활동의 가장 중요한 핵심 파라미터 중 하나이다.²⁵⁾ 또한 강우가 없는 갈수기에는 수중 영양염류 농도가 높고 일사량이 커 식물플랑크톤의 성장 조건이 충분하기 때문에 조건과 장소에 따라 DO saturation이 약 200% 수준으로 증가하기도 하지만,²⁶⁾ 본 연구에서는 70~130% 범위였다. 본 연구에서는 수온과 pH가 낮 동안에 점진적으로 증가하다가 16:00경에 가장 높았고, 이후에는 지속적으로 하락하였다(Fig. 4). DO는 14:00에 피크를 보인 후 감소하였고, 02:00에 가장 낮았다. DO saturation은 DO농도와 유사한 경향을 보였지만 변동 폭은 크지 않았다(Fig. 4). 시간대별 평균값으로 비교했을 때, 평수기에는 수온의 상승폭이 컸지만 강우기에는 DO의 상승폭이 더 크게 나타났다.

반면에, St. 2의 수온, pH, DO는 매우 일정하게 나타났다. 비록 DO는 강우에 의한 수체의 움직임(movement)으로 인해 시간대별 표준편차가 평수기보다 강우기에 약 3.3배 높게 측정되었지만, 전체적으로 St. 1과 비교하여 안정된 수질을 유지하였다. 이 결과를 통해, 개방수역은 수질의 일주기 변동이 크게 나타나 어류에게 스트레스를 줄 가능성이 높지만, 지하에 조성한 ADP 내부는 24시간 동안 일정한 수질을 유지하기 때문에 상대적으로 안정적인 피난 공간을 알 수 있다.

3.3. Vertical variations

ADP 내부에서 호기, 무산소 층(oxic, anoxic layers)과 성층(stratification)이 발생하는지 규명하기 위해 수온, pH, DO, 전기전도도를 수심별로 모니터링 하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 pH, 전기전도도는 수심별로 차이가 크지 않았으나, 수온과 DO는 수심 1.0~1.5 m 구간 동안 크게 감소하였다. 특히 수온의 경우, 수심 1.0 m 이내에서는 평균 23.9~

24.2℃의 범위를 보였으나 수심 2.0 m 지점에서는 19.2℃를 나타내었다. 이러한 thermal gradient는 DO의 수직 분포와 유사하게 나타났다.

본 연구에서 ADP의 덮개는 수심 0.7 m 지점에 위치하고, 그 이하는 ADP 내부 공간이다. ADP 내부 공간에서 덮개 아래 0.5 m까지는 외부와 유사한 수질이 조성되지만, 그 이하에서는 수온과 DO가 점차적으로 감소하였고, 덮개 아래 0.8 m 지점에서는 더 이상 감소되지 않고 유지되는 경향을 보였다. 하지만 수온과 DO가 지속적으로 감소하였기 때문에 바닥 근처에서는 무산소 층이 있을 것으로 추정된다. 전체적으로 본 연구대상지의 ADP는 성층현상을 나타내기 때문에 수심별로 다양한 환경이 조성되었으며, 다양한 생물이 각각 선호하는 환경으로 피난 및 서식이 가능할 것으로 여겨진다.

수직분포를 계절적으로 비교하면 강우기에는 강우에 의한 수체의 혼합으로 수질이 전 수심에서 일정하게 나타났다. 평수기의 수직별 최대 감소폭은 수온 4.7℃, pH 0.4, DO 4.3 mg/L인 반면에 강우기는 수온 2.3℃, pH 0.1, DO 2.9 mg/L로 나타났다. 또한, 전기전도도는 rainy season이 normal season보다 67~80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 작은 점을 미루어 볼 때, 강우시에 순환과 희석이 동시에 작용함을 추정할 수 있었다. 결국, ADP 내부는 빛이 일부 차단된 정체 공간이지만 강우 시에는 자연스러운 순환이 발생하는 것으로 보아 완전히 폐쇄된 공간이 아닌 것을 알 수 있다.

4. Discussion

본 연구에서는 지하매립형 어류 피난처 구조물인 ADP의 내·외부 수질을 분석하여 어류의 피난처에 대한 가능성을 파악하고자 하였다. ADP의 주요 특징은 외부와 비교하여 일 수질변동이 적고 일주기 현상이 일어나지 않으며, 늦봄~여름철 수온이 외부보다 4.0℃ 이상 낮으며, DO는 약 4.0

Fig. 5. Vertical variations of water temperature, pH, DO and conductivity inside the ADP (N=10).

mg/L 이상을 유지하고, 성충이 존재하지만 기상 조건에 의해 혼합과 희석이 발생하는 특징을 보였다.

본 연구에서 나타난 ADP의 기능 중 어류의 피난처로서 가장 중요한 역할은 안정된 수온 확보이다. 본 실험결과에서 ADP 내부 수온은 외부보다 낮고 안정되게 측정되었다. 어류는 수온이 상승하면 적정 수온을 찾아 이동한다. 예를 들면, 잉어과 어류인 Longfin dace (*Agosia chrysogaster*)는 고수온이 지속되면 수온이 3℃ 낮은 그늘진 웅덩이(shaded pools)로 피신하는 전략을 구사한다.²⁷⁾ 본 연구결과도 조사 시기가 수온이 상승하는 늦봄~여름이고, 개방수역의 수온 변동이 심한 점을 감안하면 어류가 ADP 내부를 효과적인 피난처로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

그동안 어류에게 수온의 중요성은 과거의 많은 연구에서 다루어져왔다.²⁸⁻³⁰⁾ 수온은 어류의 metabolic demands, digestion rates, assimilation efficiencies와 같은 생리학적 특성에 직접적인 영향을 줄 수 있다.^{31,32)} 예를 들어, 최적성장온도(optimum temperature for growth)는 연어과(salmonids) 어류의 경우 12~17℃이며,³³⁾ 잉어과(cyprinids) 어류는 20℃ 또는 그 이상의 온도로 알려져 있다.³⁴⁾ 만약 어류 서식처나 피난처가 ADP 내부와 같이 최적성장온도를 장기간 유지할 수 있다면 어류의 성장에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것이다. 본 연구에서의 조사지점의 우점종은 납자루아과(*Paracheilognathus rhombea*)인 각시붕어(*Rhodeus uyekii*)로 각시붕어의 경우, 서식환경의 적정수온은 20~24℃이며, 산란의 적정수온은 16.5~18.5℃이다.³⁵⁾ ADP의 내부 평균 온도는 18.8±0.5℃로 각시붕어가 산란하기에 적절한 수온이며, 각시붕어는 온도가 20℃ 이상으로 상승하면 생식소가 퇴화가 되어,³⁵⁾ 외부환경보다 ADP내부의 수온이 각시붕어의 산란에 적절하다고 판단된다. 각시붕어의 산란은 광조건 보다도 중요한 것이 적정한 수온이며,³⁵⁾ ADP의 수온은 각시붕어가 산란하기에 최적의 장소로 판단된다. 초기 연못을 구성할 때, 납자루아과 외에도 갈겨니(*Zacco temminckii*), 돌고기(*Pungtungia herzi*), 토종붕어(*Carassius carassius*), 미꾸라지(*Misgurnus mizolepis*), 생이새우(*Neocaridina denticulata*), 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve), 말조개(*Unio douglasiae*)를 방류 하였으나, 납자루아과 우점하는 것으로 보아 ADP가 적용된 연못의 환경조건은 납자루아과가 생존 및 산란하기에 최적의 환경으로 사료된다. 특히, 납자루아과는 말조개에 산란을 하는 독특한 어류종으로, 말조개의 경우 ADP 하단에만 투입되어 있는데 납자루아과가 ADP 내부에서 말조개를 활용하여 산란활동을 하고 있는 것으로 판단된다.

수온이 지나치게 높거나 변동이 심하면 어류에게 thermal stress를 줄 수도 있다.³⁶⁾ 어류는 고수온 조건에서 높은 대사량(metabolic)이 요구되며, 이때 질병이나 성장 억제와 같은 잠재 치사 효과를 나타낸다.³⁷⁾ 뿐만 아니라 고수온이 지속되면 어류의 체내 헤모글로빈 이동이 가속화되어 아가미로 산소를 흡수할 수 없어 질식사하거나, 생체 단백질을 변성시키기도 한다.³⁸⁾

고수온 뿐만 아니라 변동이 있는 수온 조건 역시 어류에게 제한요소가 된다.³⁹⁾ Takahara³⁹⁾는 *Cyprinid herpesvirus 3*에 감염된 carp를 대상으로 일정한 수온(22℃, 25℃)과 변동이 있는 수온 조건(22±3℃)에서 실험한 결과, 수온 변동이 있는 조건에서 *Cyprinid herpesvirus 3* 전달이 활발하고, 생존율이 낮았으며, 스트레스 지수인 cortisol이 높게 나타났다라고 보고하였다.

일반적으로 여름철 담수 공간에서 수온의 하루 변동(daily fluctuations)은 4℃ 이상이며, 지역에 따라 10℃ 이상도 나타날 수도 있다. 따라서 어류는 겨울보다 여름에 보다 높은 내성이 필요하다.¹³⁾ 어류가 많이 서식하는 littoral zone은 서식처로서 좋은 조건이지만 수온 변동이 큰 공간이기 때문에 적절한 피난처가 없다면 높은 스트레스로 인해 생식(reproduction)이나 산란과 같은 활동이 제한될 수도 있다. 본 연구대상지는 수온의 하루 변동이 4℃ 이상을 나타내어 어류의 thermal stress가 유발될 수 있는 환경이었지만, 현장조사 결과 수온이 안정된 ADP 주변에서 어류의 활동이 가장 활발하였다.

ADP의 또 다른 특징은 DO의 감소이다. ADP 내부는 빛이 차단된 공간이므로 광합성보다는 호흡이 주로 일어날 것이다. 본 연구에서 나타난 수심별 DO gradient의 농도 범위는 3.8~8.3 mg/L이며, 광합성 가능 범위는 수심 1.2 m(덮개 아래 0.5 m까지)까지로 추정되었다. 일반적으로 어류가 필요한 DO농도 범위는 ≥5.0 mg/L 수준으로 알려져 있으나,⁴⁰⁾ 종에 따라서 더 낮은 농도(cool-water fish ≥3.0 mg/L; warm-water fish ≥2.5 mg/L)에서 적응할 수 있다.^{41,42)} ADP 내부의 경우, 덮개 부근은 DO에 민감한 종 또는 치어가 많고, 수심이 깊어질수록 DO에 민감하지 않은 종이나 성어가 많을 것이다. 결국, ADP 내부는 어류가 환경 선호도에 따라 다양하게 분포할 수 있는 복합적인 피난처 공간으로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

5. Conclusions

본 연구는 지하 매립형 어류 피난처 구조물인 ADP에서 수질환경을 평가하고 그 특징을 파악하고자 하였다. 개방수역인 St. 1과 ADP인 St. 2로 구분하여 1시간 간격으로 수온, pH, DO, 전기전도도를 측정하였으며, 이화학적 수질 분석을 실시하였다. 총 측정 기간은 66일이며, 계절적으로 크게 평수기와 강우기로 구분하였다.

1) St. 2는 St. 1과 비교하여 평균적으로 수온과 DO가 낮았고, pH와 전기전도도는 유사한 수준이었다. 특히 St. 1은 수온, pH, DO의 일 변동이 컸으나, 반대로 St. 2는 매우 안정된 값을 나타내었다. 계절별로는 평수기보다 강우기에 지점별로 측정값의 편차가 작은 점을 미루어 볼 때, 강우시 혼합 및 희석 작용이 있음을 추정할 수 있었다. 그러나 이화학적 수질은 지점별로 큰 차이가 없었다.

2) 수온, pH, DO, DO saturation에 대한 일변화를 조사한 결과, St. 1은 낮 시간 동안 변화를 보였으나, St. 2는 대체로 일정하였다. two-way ANOVA로 분석했을 때 St. 1과 St. 2는 서로 뚜렷하게 다른 공간임을 나타내었다($P<0.05$).

3) 본 실험 조건에서 ADP 내부는 수심별로 thermal and DO gradient이 나타났으며, 수심 약 1.2 m 이후부터 급격히 감소하였다. ADP는 여름철에 수온 변동이 큰 외부환경보다 시원하고 안정된 공간을 조성할 수 있었으며, 수심별로 다양한 조건이 구비되기 때문에 어류가 피난 및 산란 장소로 이용하기 충분할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업인 “자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 연구단(GREEN RIVER)(12기술혁신C02)”의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

KSEE

References

- Davis, M. W., “Fish stress and mortality can be predicted using reflex impairment,” *Fish & Fisheries*, **11**(1), 1~11(2010).
- Amisah, S. and Cowx, I. G., “Response of the fish populations of the River Don in South Yorkshire to water quality and habitat improvements,” *Environ. Pollut.*, **108**(2), 191~199 (2000).
- Mo, W. Y., Cheng, Z., Choi, W. M., Man, Y. B., Liu, Y. and Wong, M. H., “Application of food waste based diets in polyculture of low trophic level fish. Effect on fish growth, water quality and plankton density,” *Mar. Pollut. Bullet.*, **85** (2), 803~809(2014).
- Hokanson, K. E., “Temperature requirement of some peccids and adaptatopns to the seasonal temperature cycle,” *J. Fish. Res. Board Can.*, **34**, 1524~1550(1977).
- Nicieza, A. G. and Metcalfe, N. B., “Growth compensation in juvenile Atlantic salmon: responses to depresses temperature and food availability,” *Ecol.*, **78**, 2385~2400(1997).
- Bridget, S. G. and Fisher, R., “Temperature influences swimming speed, growth and larval duration in coral reef fish larval,” *J. Experimental Mar. Biol. Ecol.*, **299**(1), 115~132(2004).
- Wetzel, R. G., “Gradient-dominated ecosystems: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems,” *Hydrobiologia*, **229**(1), 181~198(1992).
- Müller, U., “Periphytic primary production during spring. A sink or source of oxygen in the littoral zone,” *Limnologia*, **30**(2), 169~174(2000).
- Frankiewicz, P. and Wojtal-Frankiewicz, A., “Two different feeding tactics of young-of-the-year perch, *Perca fluviatilis* L., inhabiting the littoral zone of the lowland Sulejow Reservoir (Central Poland),” *Ecohydrol. Hydrobiol.*, **12**(1) 35~41(2012).
- Durigan, J. G., Sipaúba-Tavares, L. H. and Oliveira, D. B. S., “Estudo limnológico em viveiros de piscicultura. Parte I, variação nictimeral de fatores físicos químicos e biológicos,” *Acta Limnologica Brasiliensis.*, **4**, 211~223(1992).
- Lefébure, R., Effects of temperature and terrestrial carbon on fish growth and pelagic food web efficiency, Department of Ecology and Environmental Science, Umeå University, Sweden(2012).
- Nowosad, J., Targońska, K., Chwaluczyk, R., Kaszubowski, R. and Kucharczyk, D., “Effect of temperature on the effectiveness of artificial reproduction of dace under laboratory and field condotions,” *J. Thermal Biol.*, **45**, 62~68(2014).
- Bevelhimer, M. and Bennett, W., “Assessing cumulative thermal stress in fish during chronic intermittent exposure to high temperatures,” *Environ. Sci. Policy*, **3**, S211~S216(2000).
- McGrath, M., Climate change “may shrink fish,” Science Reporter, BBC World Service. BBS NEWS Science & Environment(2012).
- Millidine, K. J., Armstrong, J. D. and Metcalfe, N. B., “Presence of Shelter Reduces Maintenance Metabolism of Juvenile Salmon,” *Funct. Ecol.*, **20**(5), 839~845(2006).
- Finstad, A. G., Einum, S., Forseth, T. and Ugedal, O., “Shelter Availability Affects Behaviour, Size-Dependent and Mean Growth of Juvenile Atlantic salmon,” *Freshwater Biol.*, **52** (9), 1710~1718(2007).
- Matsuzaki, S. S., Sakamoto, M., Kawabe, K. and Takamura, N., “A Laboratory Study of the Effects of Shelter Availability and Invasive Crayfish on the Growth of Native Stream Fish,” *Freshwater Biol.*, **57**(4), 874~882(2012).
- Fuiman, L. A. and Magurran, A. E., “Development of Predator Defences in Fishes,” *Rev. Fish Biol. Fisheries*, **4**(2), 145~183(1994).
- Almany, G. R., “Differential Effects of Habitat Complexity, Predators and Competitors on Abundance of Juvenile and Adult Coral Reef Fishes,” *Oecologia*, **141**(1), 105~113(2004).
- Ahn, C. H., Joo, J. C., Lee, S., Oh, J. H., Ahn, H. and Song, H. M., “An experimental approach to secure freshwater fish shelter according to the water level fluctuations in a shallow pond,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **35**(9), 666~674(2013).
- Fraser, D. F. and Cerri, R. D., “Experimental Evaluation of Predator-Prey Relationships in a Patchy Environment: Consequences for Habitat Use Patterns in Minnows,” *Ecol.*, **63** (2), 307~313(1982).
- American Public Health Association (APHA), Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th edition.; American Public Health Association, Washington, D. C., USA, pp. 9~72(2005).
- Sutherland, D. L., Turnbull, M. H. and Craggs, R. J., “Increased pond depth improves algal productivity and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds,” *Water Res.*, **53**(15), 271~281(2014).
- Mann, C. J. and Wetzel, R. G., “Dissolved organic carbon and its utilization in a riverine wetland ecosystem,” *Biogeochem.*, **31**(2), 99~120(1995).

25. Belevantsev, V. I., Malkova, V. I., Ryzhikh, A. P., Smolyakov, B. S. and Anoshin, G. N., "One of the aspects of chemical and thermodynamic modeling in the solution of complex problems of the description of aqueous-system states," *Khimiya v Interesakh Ustoichivogo Razvitiya*, **12**(6), 757~767(2004).
26. Seki, H., Takahashi, M., Hara, Y. and Ichimura, S., "Dynamics of dissolved oxygen during algal bloom in Lake Kasumigaura," *Jap. Water Res.*, **14**(2), 179~183(1979).
27. Douglas, M. E., Marsh, P. C. and Minckley, W. L., "Indigenous fishes of western North America and the hypothesis of competitive displacement: Meda Fulgida (Cyprinidae) as a Case Study," *Copeia*, **1**, 9~19(1994).
28. Brett, J. R., Environmental factors and growth. In Fish Physiology, Vol. 8 (Hoar, W. S. Randall, D. J. and Brett, J. R., eds), pp. 599~675. New York: Academic Press(1979).
29. Persson, L., "Temperature-Induced Shift in Foraging Ability in Two Fish Species, Roach (*Rutilus rutilus*) and Perch (*Perca fluviatilis*): Implications for Coexistence between Poikilotherms," *J. Animal Ecol.*, **55**, 829~839(1986).
30. Persson, L., Leonardsson, K., De Roos, A. M., Gyllenberg, M. and Christensen, B., "Ontogenetic scaling of foraging rates and the dynamics of a size-structured consumer-resource model," *Theoret. Populat. Biol.*, **54**(3), 270~293(1998).
31. Byström, P., Anderson, J., Kiessling, A. and Eriksson, L. O., "Size and temperature dependent foraging capacities and metabolism: consequences for winter starvation mortality in fish," *OIKOS*, **115**(1), 43~52(2006).
32. Englund, G., Öhlund, G. C. Hein, L. and Diehl, S., "Temperature dependence of the functional response," *Ecol. Lett.*, **14**(9), 914~921(2011).
33. Elliott J. M. and Hurley M. A., "A functional model for maximum growth of Atlantic salmon parr, *Salmo salar* from two populations in north-west England," *Funct. Ecol.*, **11**(5), 592~603(1997).
34. Jobling, M., Fish bioenergetics, Chapman and Hall, London (1995).
35. Ahn, C.-M., "Effects of Photoperiod and Water Temperature on the Reproductive cycle of the Spring-Spawning Bitterling, *Rhodeus uyekii* (Pisces: Cyprinidae)," *Kor. J. Ichthyol.*, **7**(1), 43~55(1995).
36. Carveth, C. J., Widmer, A. M., Bonar, S. A. and Simms, J. R., "An examination of the effects of chronic static and fluctuating temperature on the growth and survival of spinedace, *Meda fulgida*, with implications for management," *J. Thermal Biol.*, **32**(2), 102~108(2007).
37. Johnstone, H. C. and Rahel, F. J., "Assessing temperature tolerance of Bonneville cutthroat trout based on constant and cycling thermal regimes," *Trans. Am. Fish. Soc.*, **132**(1), 92~99(2003).
38. Helfman, G. S., Collette, B. B. and Facey, D. E., The Diversity of Fishes, Blackwell Science, Malden, Massachusetts (1999).
39. Takahara, T., Honjo, M. N., Uchii, K., Minamoto, T., Doi, H., Ito, T. and Kawabata, Z., "Effects of daily temperature fluctuation on the survival of carp infected with Cyprinid herpesvirus 3," *Aquaculture*, **433**(20), 208~213(2014).
40. Kramer, D. L., "Dissolved oxygen and fish behavior," *Environ. Biol. Fishes*, **18**(2), 81~92(1987).
41. Fang, X., Stefan, H. G., Eaton, J. G., McCormick, J. H., Alam, S. R., "Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios Part 2. Cold-water fish in the contiguous US," *Ecol. Modell.*, **172**(1), 39~54(2004a).
42. Fang, X., Stefan, H. G., Eaton, J. G., McCormick, J. H. and Alam, S. R., "Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios Part 3. Warm-water fish in the contiguous US," *Ecol. Modell.*, **172**(1), 55~68(2004b).