

어류폐사의 발생 이후 하천에서 수질의 변화 및 어류상 회복

이재용 · 이광열¹ · 이새로미 · 최재석² · 이석종³
정성민 · 정명숙⁴ · 김범철*

(강원대학교 환경학과, ¹강원대학교 생명과학과, ²강원대학교 환경연구소,
³강원도 보건환경연구원, ⁴국립환경과학원)

Recovery of Fish Community and Water Quality in Streams Where Fish Kills have Occurred. Lee, Jae-Yong, Kwang-yeol Lee¹, Saeromi Lee, Jaeseok Choi², Seok-Jong Lee³, Sungmin Jung, Myoung-Sook Jung⁴ and Bomchul Kim* (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; ¹Department of Biological Science, Kangwon National University; ²Environmental Research Institute at Kangwon National University; ³Gangwon Institute of Public Health and Environmental Research, Chuncheon 200-090, Korea; ⁴National Institute of Environmental Research, Incheon 404-808, Korea)

The species composition of the fish community was studied in four streams where fish kills have previously occurred in recent years; Worun Stream, Seo Stream, Jangnam Stream, and the Anyang Stream. The number of fish species varied from 22 to 86% compared to the number of fish species pre-fish kill. The recovery of fish populations in the streams seems to be determined by water quality and the presence of artificial structures in the streams. The Jangnam Stream, where alkaline pH caused a fish kill, showed a high recovery of fish species due to improvements in water quality. Anyang Stream had a low number of species, possibly because dissolved oxygen concentrations were intermittently low. Artificial structures in streams had a negative impact the recovery of fish species, particularly for benthic fish species. It appears that fish populations can recover rapidly when water quality improves or the movement of fish community is unimpeded. However, water quality and artificial structures in many streams in Korea still present adverse conditions for fish survival, deterring the recovery of fish populations. To conserve fish populations in streams, habitat all owing unimpeded movement for fish and controls on pollutant inputs are needed.

Key words : fish kills, recovery, benthic fish species, water quality, artificial structures

* Corresponding author: Tel: +82-33-250-8572, Fax: +82-33-251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

서 론

어류폐사는 주로 호수보다는 하천에서 빈번하게 발생하곤 한다 (Haslouer, 1983). 하천으로 유입하는 오염원으로 인한 수질악화는 어류 개체군 및 다른 수서생물에게까지 부정적인 영향을 미친다. 수질악화는 어류의 생리생화학적 불균형을 유도하여 어류폐사의 직접 또는 간접적인 요인들로 작용한다. 담수에서 흔히 발생하는 어류폐사의 원인으로서는 수온급변 (Durhan *et al.*, 2006), 용존산소의 고갈 (Matthews and Berg, 1997), 암모니아 (Yang and Chun, 1986; Foss *et al.*, 2003), 중금속의 유입 (Van Hoof and Van San, 1981), 염소 (Zeitoun, 1977; Cohen, 1977; Katz, 1979), 식물플랑크톤의 독소 (Park *et al.*, 2008) 그리고 병원균에 의한 감염 등의 다양한 원인들이 보고되었다. 특히, 도심하천에서 발생하는 어류폐사는 수온의 상승, 생활하수 또는 도시비점원오염의 유입, 그리고 강우 시 혐기성 상태의 하천 바닥의 교란 등이 주된 원인으로 알려져 왔다 (Durhan *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006). 그럼에도 불구하고 현장에서 어류폐사의 원인이 규명되는 것은 극히 일부에 지나지 않는다. 이는 어류폐사가 발생한 당시의 원인을 현장에서 파악하는 것이 어렵고, 어류폐사의 발생을 예측할 수 있는 시스템의 구축 또한 미흡한 상태이기 때문이다. 더욱이 어류폐사는 그 원인이 복잡적이고 실험실 규모에서 재현하기 어렵기 때문에 직접적인 원인을 규명하기가 쉽지 않다 (Raleigh *et al.*, 1978; Haslouer, 1983; Lee *et al.*, 2006).

강원도 상류하천들의 지형 및 구조적 특성은 하천 주변을 따라 경작지가 인접해 있는 지역이 많다. 하천 구간 사이에는 이치수를 목적으로 설치한 보와 같은 인공구조물이 많다. 하천의 흐름을 막는 인공구조물은 오염원이 하천 내로 유입될 경우 어류군집을 오염원에 장기간 노출시키는 요인으로 작용하기 쉽고, 일단 어류폐사가 발생한 이후에는 어류군집의 회복 또한 지연시키는 원인이 된다 (Raleigh *et al.*, 1978; Yoon *et al.*, 2010; Kubach *et al.*, 2011). 실제적으로 하천 내 인공구조물은 어류의 이동을 제한시켜 어류의 서식분포 및 성장의 억제제 (Han *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2010), 개체수 및 어종의 감소를 야기하는 요인이 되는 것으로 알려져 있다 (Seo, 2005; Kim *et al.*, 2007b). IDNR (2002)은 어류폐사가 발생한 23개 하천을 대상으로 1999년에서 2001년 사이에 어류의 회복에 대한 조사결과를 보고하였는데, 어류폐사가 발생한 구간에서 어류상의 회복은 5~60개월이 걸린다고 하였다. 일부 어류폐사 이후에 추가적으

로 발견되는 종들은 어류폐사 시 영향을 받지 않았던 구간으로부터의 이동에 의한 유입이었고, 어류폐사가 발생한 구간에서 어류상이 회복되는데 장애적인 요인으로는 수질 및 서식처와 관련이 있다고 하였다.

본 연구의 목적은 어류폐사가 발생한 강원도의 3개 하천 (월운천, 서천, 장남천)과 도시하천인 안양천을 대상으로 어류폐사 발생 이후 어류개체군의 변동과 수질환경의 변화에 대해 파악하고자 하였다 (Fig. 1).

재료 및 방법

1. 과거 어류폐사 발생현황 및 조사지 개황

우리나라의 담수생태계에서 보고된 어류폐사 발생과 관련한 자료는 강원도보건환경연구원과 서울시보건환경연구원에서 제시한 자료를 토대로 하였는데, 강원도 지역 (2004~2009년)과 서울 도심하천 (1996~2009년)에서 발생한 어류폐사의 월별 및 연도별 발생건수의 추이와 원인을 파악하였다 (Fig. 2). 월운천, 장남천 그리고 서천에서의 어류폐사는 각각 2008년 10월 2일, 2009년 2월 9일 그리고 2009년 11월 23일에 유량이 감소한 늦가을에서 동절기 사이에 발생하였다. 월운천은 농업용 저수지 내의 무산소층이 발달한 수층의 물을 저류지 하류로 방류하는 과정에서 어류폐사가 발생하였다. 장남천은 동절기 동안 하천 내 콘크리트구조물의 부식으로 인한 알칼리성 pH (10 이하)의 물에서 피해를 입은 어류가 점진적으로 폐사한 것으로 조사되었다. 그리고 양구 서천의 경우, 어류폐사의 원인이 하천에서 은행종피를 대량으로 세척하는 과정에서 발생한 산성 pH 및 독성물질의 영향 (Lee *et al.*, 2011)으로, 폐사한 어류가 확인된 구간 (3 km) 내에 무려 6개 가량의 보가 설치되어 있었다.

본 논문에서는 월운천, 장남천 그리고 서천을 대상으로 어류폐사 발생 후 3~6회 (2개월~1년의 조사 기간)에 걸쳐 어종의 변화를 조사하였다 (Tables 2, 3). 어류조사는 각 하천에서 3개의 구간을 조사하였다 (Fig. 1). 즉, 어류폐사의 영향을 받지 않은 상류구간 (비영향구간; St. 1), 어류폐사가 발생한 구간 (St. 2) 그리고 어류폐사가 발생한 구간의 하류 구간인 잠재적인 영향구간 (St. 3) 등 3구간에서 조사를 수행하였다. 다만, 월운천은 어류폐사가 발생한 저류지 (St. 2, 수심 1.5 m 이내)의 상류에 농업용저수지 (수심 9 m)가 위치하고 있어, 비영향구간 (St. 1)으로 농업용저수지의 유입 하천을 대상으로 조사하였다.

안양천은 안양시, 군포시를 지나 서울 강서구 염창교에서 한강 본류와 합류하는 유로 연장 32.21 km의 하천이

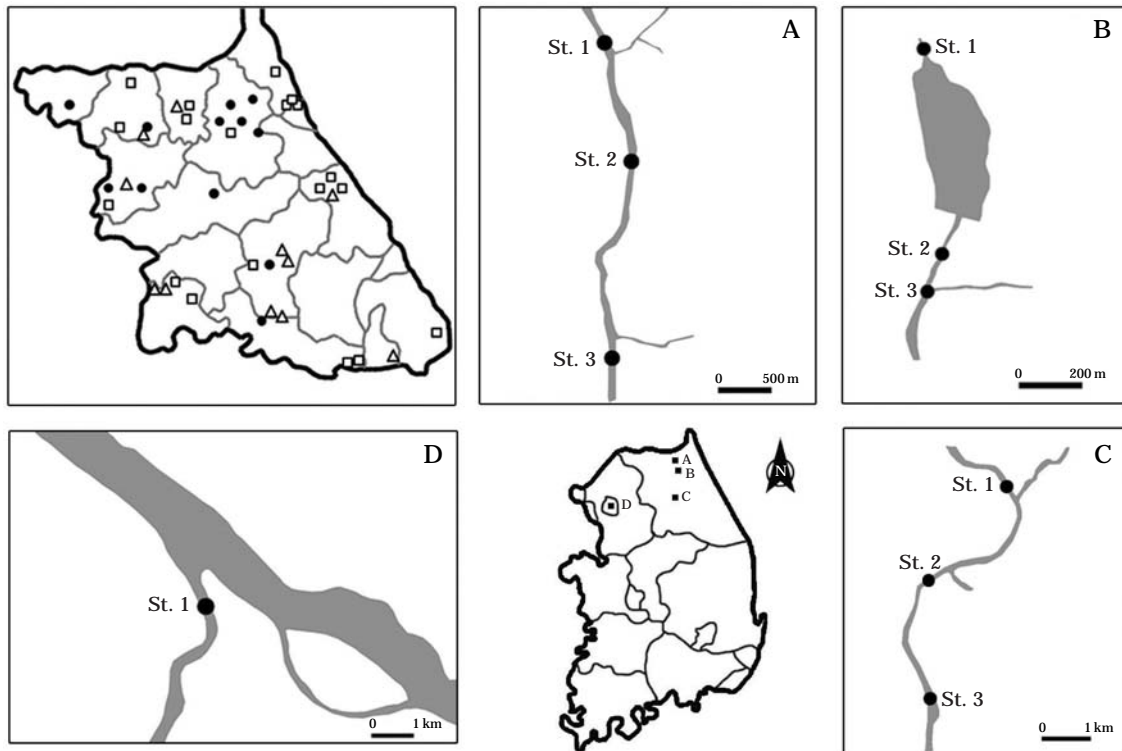


Fig. 1. Map of the study site and the fish kill events recorded in Gangwon-do from 2007 to 2009. Each symbol refers to the year when fish kill events occurred; closed circle (2007), open square (2008) and open triangle (2009). Letters indicate study sites; A (Jangnam Stream), B (Worun Stream), C (Seo Stream) and D (Anyang Stream).

다. 안양천에서는 유입지천이 11개가 있으며 서울 양천구 목동 양화교에 수질측점이 있다. 안양천 하류지역에서는 과거 1997~2005년 사이에 어류폐사가 확인된 바가 있으며 폐사한 어종은 누치, 잉어, 붕어 등이었다 (Cho, 2006). 이들 시기에 안양천 수계에서 발생한 어류폐사의 원인은 주로 용존산소농도의 고갈에 의한 영향이었다. 본 논문에서는 안양천에서 폐사가 빈번하게 발생하는 시기에 해당하는 3월 중순, 4월 말 그리고 9월 각각의 시기에 수질자동측정장치를 이용하여 수질모니터링을 수행하였다 (Fig. 1).

2. 조사하천에서의 수질환경 조사

본 연구에서는 수온과 용존산소 (YSI-55), pH (Denver model 15) 그리고 탁도 (HACH 2100P)를 현장에서 측정하였다. 영양염류는 어류를 채집한 구간에서 표층수를 채수하였으며, 채수한 시료는 실험실로 운반하여 분석하였다. 총인 (TP)은 Standard Methods에 따라 ascorbic acid 법에 의한 흡광광도법으로 측정하였고, 총질소 (TN)는 persulfate 법으로 측정하였다 (APHA, 1998).

도심하천인 안양천에서는 한강본류로부터 어류가 소상하는 길목이고 반복적으로 어류폐사가 발생하는 하류 지점을 선정하여 수질자동측정장치 (In Situ, Troll 9500)를 하천 바닥에서 50 cm 부상시켜 설치운영하였다. 측정간격은 15~30분 간격으로 2010년 3월과 4월, 몬순강우 이후인 2011년 9월 그리고 2012년 3월 중순에 수질자료 (수온, 용존산소농도, 탁도)를 얻었다. 안양천의 강우량은 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공받았다 (<http://www.wamis.go.kr>).

3. 어류폐사가 발생한 강원도 상류하천에서의 어류상의 변화

어류의 채집은 투망 (7 mm mesh; $2\text{ m}^2 = \pi \times 0.8\text{ m}^2$)과 족대 (5 mm mesh; $1\text{ m}^2 = 1\text{ m} \times 1\text{ m}$)를 이용하여 각 구간에서 죽은 개체와 살아 움직이는 개체를 40분간 채집하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정·계수하였다. 어류의 동정은 Kim *et al.* (2007a)과 Kim and Park (2007)에 의거하였다.

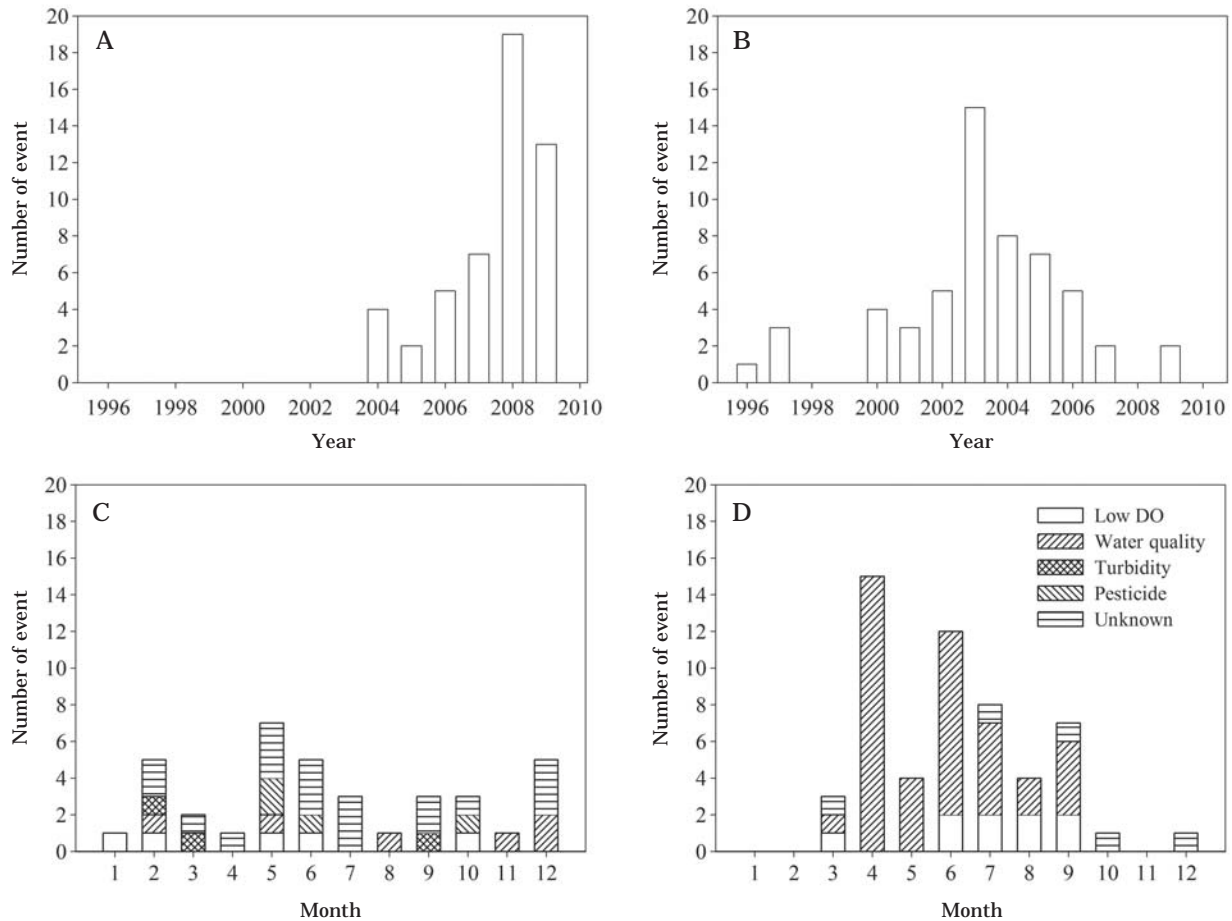


Fig. 2. Yearly and monthly trend in total number of fish kill events from 2004 to 2009 in Gangwon-do (A, C) and from 1996 to 2009 in Seoul urban streams (B, D). Seoul urban streams; Anyang Stream (1997~2009), Jungrang Stream (1996~2007), Tan Stream (1996~2007), Yangjae (2004~2005) and Cheonggye Stream (2006).

결 과

1. 과거 어류폐사 발생현황 및 그 원인

강원도지역에서 발생하는 어류폐사는 서울 도심하천과는 달리 매년 단회적이었으며, 같은 하천에서 재발하는 경우는 극히 드물었다 (Fig. 1).

어류폐사의 발생건수는 강원도 상류하천 (2004~2009년)에서는 매년 증가하는 양상을 보였는데, 2008년과 2009년에는 어류폐사 발생 건수가 예년에 비해 2배 이상 증가하였다 (Fig. 2A). 반면, 도심하천 (1996~2009년)에서는 2003년 이후 매년 감소하는 추세를 보였다 (Fig. 2B).

어류폐사가 발생하는 시기는, 강원도 상류하천에서는 동절기 (2~3월), 논 경작기 (5~7월) 그리고 몬순강우 직후 (9~10월)에 어류폐사의 발생빈도가 높았다 (Fig. 2C).

서울 도심하천에서 어류폐사가 발생하는 시기는 초기 강우 (4월)가 내리는 시기와 몬순강우기 (6~7월)에 집중적으로 발생하였다 (Fig. 2D).

강원도 내 조사하천들에서는 월별 어류폐사가 발생하는 원인들 중 원인불명이 54%로 나타났다. 서울 도심하천에서는 수질악화와 용존산소농도의 고갈로 인한 영향이 전체 어류폐사의 91%로, 강원도 하천이 28%인 상황을 고려한다면 도심하천에서 수질악화로 인한 영향을 최소화 할 수 있는 방안이 절실하다고 본다.

2. 어류폐사가 발생한 상류하천의 수질 및 어류상의 변화

조사하천에서의 수질측정결과는 Table 1에 제시하였다. 강원도 상류하천에서 용존산소농도와 pH는 각각 9.1~15.2 mgO₂ L⁻¹, 7.4~7.7의 범위를 보였다. 전기전도도는 97~

Table 1. Water quality parameters in streams where fish kills have occurred and number of surveys (mean \pm SD).

Stream	Temperature (°C)	DO (mgO ₂ L ⁻¹)	pH	Conductivity (μ S cm ⁻¹)	TN (mgN L ⁻¹)	TP (μ gP L ⁻¹)	n
Worun	17.2 \pm 0.3	9.1 \pm 0.5	7.4 \pm 0.1	97 \pm 1	0.91 \pm 0.27	25 \pm 7	3
Seo	7.1 \pm 0.5	13.4 \pm 0.6	7.7 \pm 0.2	144 \pm 7	3.36 \pm 0.41	28 \pm 10	3
Jangnam	2.7 \pm 2.0	15.2 \pm 2.7	7.7 \pm 0.9	203 \pm 97	2.37 \pm 0.82	8 \pm 2	6

n indicates number of surveys.

Table 2. List of species identified at the time of fish kills, and post-fish kills, for three streams.

Species	Habitat	Fish kill			Post-fish kill		
		Seo	Worun	Jangnam	Seo	Worun	Jangnam
Cyprinidae							
<i>Carassius auratus</i>	Drifting	○			○	☆●	
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	Drifting		○		●		
<i>Pseudorasbora parva</i>	Drifting	○			☆	●	
<i>Ladislavia taczanowski</i>	Drifting					●	
<i>Hemibarbus longirostris</i>	Drifting	○			○		
<i>Pseudogobio esocinus</i>	Benthic	○	○		○		
<i>Icrophysogoo yaluensis</i>	Benthic				●	●	
<i>Pungtungia herzi</i>	Drifting	○			○	●	
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	Drifting	○			○		
<i>Moroco oxycephalus</i>	Drifting		○	○	●	○	○
<i>Zacco koreanus</i>	Drifting	○		○	☆	☆●	○
<i>Zacco platypus</i>	Drifting	○	○		○	☆	●
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	Benthic	○		○	○		○
<i>Opsariichthys bidens</i>	Drifting	○					
Centropomidae							
<i>Hcoreoperca herzi</i>	Drifting	○					
Centrarchidae							
<i>Micropterus salmoides salmoides</i>	Drifting		○				
Cobitidae							
<i>Nemacheil ustoni</i>	Benthic	○	○	○	○	○	○
<i>Iksookimia koreensis</i>	Benthic	○		○	○		○
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	Benthic		○		●	☆	
Siluridae							
<i>Silurus asotus</i>	Benthic		○		●		
<i>Silurus microdorsalis</i>	Benthic	○		○			
Osmeridae							
<i>Hypomesus nipponensis</i>	Drifting					☆●	
Gobiidae							
<i>Rhinogobius brunneus</i>	Benthic		○		●	☆	
Amblycipitidae							
<i>Liobagrus andersoni</i>	Benthic	○		○			○
Total number of species in fish kill					9	2	6
Total number of drifting species					6	7	1
Total number of species		15	9	7	17	12	7

● indicate fish species which were not collected as fish kill.

☆ indicates fish species which were collected in non-affected sites (St. 1).

203 μ S cm⁻¹를 보였다. 총질소와 총인농도는 각각 0.91 ~ 3.36 mgN L⁻¹와 8 ~ 28 μ gP L⁻¹의 범위를 보였다.

본 연구에서 조사한 하천들에서 어류의 종조성은 어류

폐사 당시와 어류폐사 이후 사이에 차이를 보였다. 반면, 중수의 차이에 있어서는 어류폐사 당시와 어류폐사 이후에 장남천을 제외한 두 하천(월운천, 서천)에서는 거의

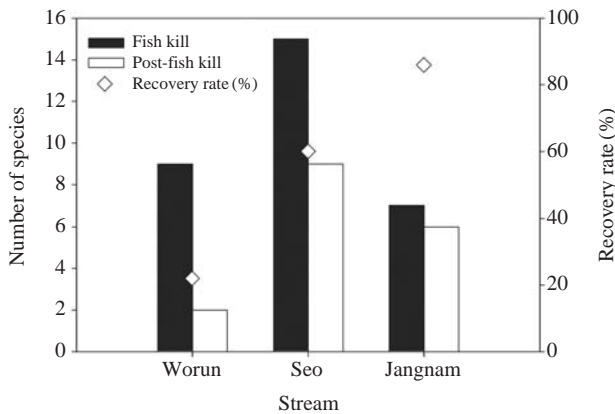


Fig. 3. Recovery rate (%; diamond) and total number of species in three streams at the time fish kills and post-fish kills.

나타나지 않았다 (Table 2). 어류폐사 당시에 채집된 총종수는 서천, 월운천 그리고 장남천에서 각각 5과 15종, 5과 9종 그리고 4과 7종으로 나타났고, 어류폐사가 발생한 이후에 확인된 총종수는 서천, 월운천 그리고 장남천에서 각각 3과 17종, 4과 12종 그리고 3과 7종이 확인되었다 (Table 2). 이는 어류폐사 당시에 폐사가 확인된 어종 이외에 새로이 유입하여 정착한 종이 추가적으로 확인되었기 때문이다.

조사기간에 어류폐사 당시에 확인한 어종 이외에 새로이 확인한 어종은 서천에서 6종 (중고기, 버들치, 돌마자, 미꾸리, 메기, 그리고 밀어), 월운천에서 7종 (붕어, 돌고기, 참붕어, 새미, 참갈겨니, 돌마자, 그리고 빙어)이 확인된 반면, 장남천에서는 피라미 1종이 새로이 확인되었다.

또한, 조사하천들에서 어류폐사 당시에 확인한 어종의 재출현 유무를 파악하였는데, 하천에 따라 다른 회복양상을 보였다 (Fig. 3). 서천에서는 어류폐사 당시 확인한 15종 중에서 어류폐사 이후의 조사에서 9종 (60%)이 재확인되었으며, 6종 (참붕어, 참갈겨니, 끄리, 미유기, 통가리 그리고 껍지)은 다시 확인되지 않았다. 월운천에서는 폐사한 어류 9종 중에서 2종 (버들치, 대륙종개)만이 다시 확인되어 22%의 낮은 회복률을 보였다. 장남천에서는 1종 (미유기)을 제외한 나머지 종이 확인이 되어 어류폐사 당시에 채집되었던 어종으로의 회복 (86%)을 보였다.

3. 안양천의 수환경 변화

도심하천인 안양천에서는 용존산소농도의 일주기변동과 용존산소 고갈현상이 조사기간 확인되었다 (Fig. 4). 용존산소농도가 $2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이하로 감소하는 시기는 2010

년 4월 27일, 2011년 9월 9일 그리고 2012년 3월 16일 이후로 나타났고, 주로 저녁시간으로 확인되었다. 용존산소농도의 고갈현상이 확인된 시간은 4월 26일 20시 (1.4 mg L^{-1})에서 4월 27일 16시 30분 (1.7 mg L^{-1})까지 약 20시간에 걸쳐서 지속되었고 2011년 9월 그리고 2012년 3월에는 용존산소농도 고갈현상의 지속기간이 길어졌다 (Fig. 4). 수온의 변동 ($5.8 \sim 22.0^\circ\text{C}$)은 3월에 비해 수온이 높은 4월에 변동 폭이 크게 나타났다 (Fig. 4). 탁도 ($10.9 \sim 1045 \text{ NTU}$)는 3월 중순과 4월말에 불규칙하게 높았고 용존산소농도가 낮아지는 기간에 전반적으로 높았다.

한편, 2011년 9월과 2012년 3월에는 5 mm 이하의 비가 내린 이후 용존산소농도가 지속적으로 감소하고 진동폭은 약화되는 양상을 보였다 (Fig. 4). 2011년 9월과 2012년 3월에 수온은 각각 $22.1 \sim 27.2^\circ\text{C}$, $6.2 \sim 16.9^\circ\text{C}$, 탁도는 각각 $18.7 \sim 24.7 \text{ NTU}$, 4.6 NTU 이하의 범위를 보였다 (Fig. 4).

고 찰

1. 강원도 상류하천에서의 어류상의 변화

하천에서 어류폐사 이후 어종의 회복 및 어종의 변화는 수질변화, 하도의 구조적인 특성 및 하천에 분포하고 있는 어종에 의존하는 양상을 보였다. 이는 어류폐사가 발생한 당시의 수질적인 환경의 회복 및 계절에 따른 새로운 어종으로의 군집의 변화가 반영된 결과로 사료된다.

어류폐사가 발생한 조사하천들은 조사기간에 새로운 어종의 유입과 어류폐사 당시에 확인한 어종이 확인되었다. 또한 어류폐사가 발생한 당시에 확인된 종수에 비해 어류폐사가 발생한 이후에 장남천 (피라미의 출현)을 제외한 월운천과 서천 모두에서 종수의 증가를 보였다 (Table 2). 이는 하천의 수질이 어류가 서식할 수 있는 환경으로의 안정화 및 새로운 어종의 유입에 대한 간접적인 증거라고 할 수 있다 (Tables 1, 2). 특히, 장남천의 경우 어류폐사가 발생한 당시의 pH는 $9.0 \sim 10.0$ 사이를 보였으나 어류폐사 이후 전형적인 하천수의 pH의 범위로 바뀌었다.

조사하천들에서 우점하는 어종 개체수의 변화를 비교해 볼 때, 어류폐사가 발생한 구간 (St. 2)에서는 폐사 당시에 확인한 어종의 개체수가 비영향구간 (St. 1)과 비교하여 적었다 (Table 3). 이와 같은 현상은 하천 내 하도의 구조적인 특성과 관련이 있는 것으로 사료된다.

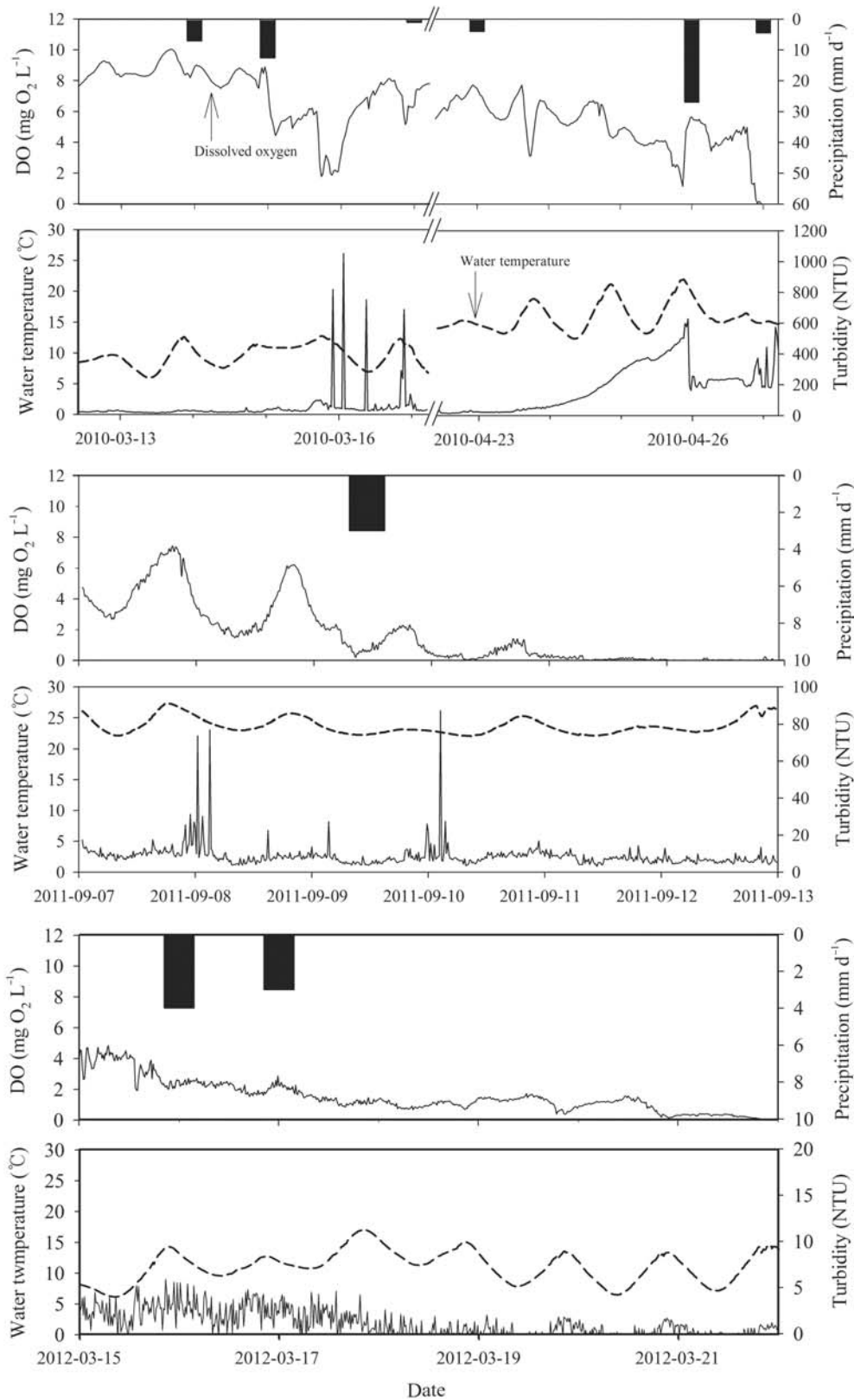


Fig. 4. Diel fluctuations in hydroparameters, as determined through the use of a continuous monitoring system at the mouth of the Anyang Stream during March and April, 2010, September, 2011 and March, 2012.

Table 3. Seasonal variations of individual number of fish species collected at Worun Stream, Seo Stream and Jangnam Stream.

Name	Date	Site	CA	SN	PP	LT	HL	PE	IY	PH	SGM	MO	ZK	JP	CS	NU	IK	MA	HO	SA	RB	LA		
Worun	Dec.08.2009	St.1						37				76	5		79	4						55		
		St.2										128				4								
		St.3							2			79				19							1	
	Mar.05.2010	St.1	1									32	1	2				4		76			33	
		St.2			1							29				2								
		St.3				9						157				25								
	Apr.02.2010	St.1	1						37			108	1	7		79		8		76			88	
		St.2			1							157				6								
		St.3				9			2			236				44							1	
	SUM		2	2	2	18		74	4	4	1002	2	14		258		16		152			178		
	Seo	Dec.08.2009	St.1	6				4	6		2	8		46				2						
			St.2		2			4	4	4	4	4	8		52									4
			St.3				34		26	8			2		38							2		
		Mar.05.2010	St.1	12				14	12				14		692									
			St.2									4	4		68									
St.3			2			4	10	4	8	16		320						4		2			2	
Apr.02.2010		St.1	8		2		74	4	6	14	20	2	1290											
		St.2				4	2	12	34	16	28	70	2		6									
		St.3				12		6	18	152	10	228				2		4						
SUM		28	2	2	150	38	60	84	202	94	2	2804	2	2	2	6	10		4			6		
Jangnam		Jan.11.2009	St.1											156				1						
			St.2									12	29		1		5							1
			St.3									28	25				2							
		Mar.11.2009	St.1										38	450										
			St.2										45	145		2	26	1						1
	St.3										87	51				21	2						1	
	Mar.27.2009	St.1										18	208			2	1							
		St.2										19	59											
		St.3										22	18											
	Feb.18.2010	St.1										26	14										6	
		St.2										32	74										6	
		St.3										54	12			2	2							
	Mar.05.2010	St.1										18	8											
		St.2										32	118										14	
		St.3										14	174	12		48	2						2	
Apr.01.2010	St.1										18	22			6									
	St.2										6	200			8							4		
	St.3										32	112	50	3	34	6								
SUM										501	1875	62	6	165	14						35			

Fish species name is abbreviated CA; Carassius auratus, SN; Sarcocheilichthys nigripinnis, PP; Pseudorasbora parva, LT; Ladislavia taczanowski, HL; Hemibarbus longirostris, PE; Pseudogobio esocinus, IY; Icrophysooo yaluensis, PH; Pungtungia herzi, SGM; Squalidus gracilis majimai, MO; Moroco oxycephalus, ZK; Zacco koreanus, ZP; Zacco platypus, CS; Coreoleuciscus splendidus, NU; Nemacheil ustoni, IK; Iksookimia koreensis, MA; Misgurnus anguillicaudatus, HN; Hypomesus nipponensis, SA; Silurus asotus, RB; Rhinogobius brunneus, LA; Liobagrus andersoni

월운천에서는 어류폐사가 발생한 저류지 (St. 2)에서 어류폐사 당시에 확인한 버들치를 제외한 다른 어종은 낮은 개체수 증가를 보였다. 이는 비영향구간 (St. 1)과 저류지 (St. 2) 사이에 농업용저수지가 위치해 수문이 닫혀 있기 때문이다. 또한 하류에서 소상하는 어종 (새미, 돌고기, 대륙종개 그리고 밀어)은 잠재적인 영향구간 (St. 3)에 국한되어 분포하고 있어 저류지 (St. 2)로의 어종의 추가 유입은 드물었다 (Table 3). 버들치 (*Moroco oxycephalus*)의 개체수가 오히려 다른 구간에 비교해서 많은 출현을 보였는데, 이는 하도 내 자연적으로 형성된 모래퇴적층과 관련이 있는 것으로 사료된다. 어류폐사 당시 하류방향을 향하여 입구가 개방되어 있던 모래퇴적층 내에 있던 개체들은 대부분 폐사원인에 직접적으로 노출되지 않아 살아남은 것으로 사료된다.

서천의 경우에는 조사기간 동안 어류폐사의 영향을 받지 않은 상류구간 (St. 1)에서는 급격한 피라미 (*Zacco platypus*) 개체수의 증가를 보인 반면, 어류폐사가 발생한 구간 (St. 2)과 잠재적인 영향구간 (St. 3)에서는 피라미의 개체수의 회복이 상대적으로 느렸다. 서천의 하도 내에는 어류폐사의 영향을 받은 구간 (St. 2)과 잠재적인 영향구간 (St. 3) 사이에 다수의 보가 설치되어 있어 상류로의 어류 이동을 방해하는 요인이 되고 있다.

장남천에서, 2009년 어류폐사 당시, 비영향구간 (St. 1)에 분포하는 참갈겨니 (*Zacco koreanus*)의 개체수가 어류폐사의 영향을 받은 구간 (St. 2)과 잠재적인 영향구간 (St. 3)에 비해 3배 이상의 많은 개체수를 보였다. 하지만 2010년에는 오히려 2009년에 비교하여 비영향구간 (St. 1)에 분포하던 참갈겨니의 개체수는 급격한 감소를 보였다. 장남천에서 비영향구간에 있는 보의 수문을 2010년에 인위적으로 개방시키는 과정에서 비영향구간의 수위 (1.5 m 이내)가 급격하게 감소 (0.3 m 이내)하였고, 참갈겨니의 상당한 개체가 하류로 이동한 것으로 사료된다.

따라서 조사하천들에서 어류폐사의 영향을 받은 구간의 종수 및 개체수의 증가는 비영향구간 또는 잠재적인 영향구간으로부터 소상하는 어종의 유입 또는 인공구조물의 유무에 의존하는 것으로 사료된다 (Rahel and Hubert, 1991).

어류폐사가 발생한 조사하천들에서 회복되거나 새로이 추가되는 어종의 유영특성은 조사하천들에서 공통적으로 저서성 어류에 비해 부유성 어류의 출현 및 회복이 빠른 것으로 나타났다 (Tables 2, 3). 어류폐사가 발생한 구간에서 어류폐사 당시에 확인한 어종의 재출현 및 조성의 변화는 서천에서의 들마자 (*Icrophysogoo yaluensis*)를 제외하고 부유성 어류가 저서성 어류에 비해 빠르게 기여하

는 것으로 나타났다 (Table 2). 저서성 어류인 대륙종개 (*Nemacheil ustoni*)는 어류폐사 당시에는 3곳의 하천에 모두 분포하는 어종이었다. 그러나 서천을 제외한 나머지 두 하천 (장남천과 월운천)에서는 어류폐사가 발생한 영향구간 (St. 2)까지도 분포하는 것이 확인되었다 (Table 3). 서천의 경우는 두 하천과는 달리 어류폐사가 발생한 구간 내 (약 3.5 km)에 6개의 보가 설치되어 있어 어류 특히, 저서성 어류의 이동을 저해 할 가능성이 크다고 본다. 하천의 유량이 적은 갈수기일수록 하천 내 인공구조물 (사방댐, 보)의 존재가 저서성 어류의 이동을 저해하는 원인으로 작용하는 것으로 사료된다 (Yoon *et al.*, 2010; Kubach *et al.*, 2011). 어류폐사 당시에 확인된 메기과의 어종 (메기, 미유기)은 어류폐사 이후 폐사구간에서는 확인되지 않았다. 한편, Cooney and Kwak (2013)는 저서성 어류인 망둥어과의 경우 하천 내 보를 거슬러 오를 수 있는 능력이 있다고 하였다. 본 논문에서도 망둥어과인 밀어는 보가 있는 서천에서 어류폐사의 영향을 받는 구간에서 확인되기도 하였다.

Kubach *et al.* (2011)는 South Carolina의 Reedy 강에서 유류의 누출로 인한 어류폐사를 보고하였는데, 어류폐사 발생 이후 52개월 정도가 되어서 어류폐사의 영향을 받지 않은 상류 구간의 어류군집과 비슷한 종조성으로 회복하였음을 보인 바가 있다. 어류의 회복을 지연시키는 원인으로 그들은 인위적인 구조물의 존재를 지적하였다. Raleigh *et al.* (1978)는 인위적인 구조물이 없는 하천에서 어류폐사 이후 어류의 개체군은 거의 1~2년 이내로 빠른 회복을 보인다고 하였다. 하지만, Yoon *et al.* (2010)은 어류의 군집이 회복되는데 3년이 소요되었는데, 하천 내에 존재하는 보가 어류의 이동을 방해하기 때문이라고 지적하였다. 따라서 어류폐사가 발생한 하천에서 폐사가 발생한 구간 내에 당시의 어종으로의 회복은 계절변동에 따른 당시의 어종이 회복되기까지는 계절변동에 따른 어류의 이동능력, 어류의 유영 특성 그리고 인위적인 구조물의 존재 유무 등 복합적인 요인이 영향을 미치는 것으로 사료된다 (Raleigh *et al.*, 1978; Ensign *et al.*, 1997; Yoon *et al.*, 2010; Kubach *et al.*, 2011). 결과적으로, 어류폐사가 발생한 하천에서 어류폐사 당시에 확인된 어류의 회복 및 개체수의 증가는 하도의 구조적인 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다.

한편, 강원도 상류하천유역에는 농업에 의한 인위적인 활동이 집약되어 있고 2004~2010년 사이에 발생한 어류폐사의 10%가 5월과 6월에 농약에 의한 영향으로 알려져 있다 (Fig. 3C). Haslouer (1979)는 1963~1978년 사이에 Kansas에서 발생한 어류폐사의 38%가 농업활동에 의

한 영향 때문이었음을 보고한 바 있다 (Haslouer, 1983). 강원도 상류하천에서의 어류폐사가 도심하천과는 달리 매년 증가하고 있고 원인을 알 수 없는 사례가 5~7월 사이에 집중되어 있는 만큼 농업활동에 의한 유해오염물질의 하천유입에 따른 어류폐사의 관련성에 대해서도 재고해 볼 필요가 있다.

2. 안양천 하구에서의 수환경 변화

기존의 연구에 의하면, 도심하천에서 발생하는 어류폐사는 주로 봄과 몬순강우 직후에 집중되는 경향을 보인다 (Haslouer, 1983; Lee *et al.*, 2004). Haslouer (1983)는 1979~1980년 사이에 Kansas의 어류폐사의 원인을 파악한 연구에서 어류폐사가 발생하는 시기는 봄(68%)에 집중되어 있음을 보인 바가 있다. Thronson and Quigg (2008)은 미국의 Texas bay와 Galveston bay에서 발생하는 어류폐사의 원인을 조사한 결과에서 낮은 용존산소농도에 의한 폐사원인이 각각 57%, 78%이었음을 보고한 바가 있다.

도심하천의 바닥에 누적된 오염원은 강우기와 같은 수체의 교란이 있는 시기에 용존산소의 감소를 야기시켜 어류폐사의 잠재적인 원인으로 작용할 가능성이 크다. 불투수층의 면적이 넓게 분포하는 도심하천에서의 수질악화는 첫 강우 (first flush) 및 CSOs (combined sewer overflows)의 직접적인 하천 유입과 관련이 있다 (Lee *et al.*, 2004; Roh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006; Cho, 2006). 강우로 인해 도로상에 누적된 오염원의 하천유입과 하상의 혐기적인 상태가 교란되면서 수체 전반으로의 무산소층의 확산이 이어지기 때문이다 (Graczyk and Sonzogni, 1991; Lee *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2012).

안양천에서는 초기 강우 시기와 몬순강우 직후에 어류폐사가 빈번하게 발생하였다 (Seoul Regional Construction Management Administration, 2010). 기존에 서울지방국토관리청에서 안양천과 한강의 합류부에서 조사한 결과에 따르면 2009년 4월에 2과 5종 24개체가 출현한 것으로 보고되었다. 이들 중 잉어 (*Cyprinus carpio*)가 13개체로 우점하였고 붕어 (*Carassius auratus*)가 7개체로 아우점하였다. 이 외 한국고유종인 가시납지리 (*Acanthorhodeus gracilis*)와 참물개 (*Squalidus chankaensis tsuchigae*)의 출현이 소수 있었던 것으로 보고되었다 (Seoul Regional Construction Management Administration, 2010). 반면에, Kim *et al.* (2012)은 2009년 11월에서 2010년 4월 중순까지 4회에 걸친 조사에서 1과 4종(떡붕어, 잉어, 각시붕어, 송어)의 출현 어종을 보고하였고 이 기간

어획한 개체수는 15개체에 불과하였다. 이는 본 조사 지역이 한강 본류와 인접하고 있고 어류가 산란을 위해 상류하천으로 소상하기 시작하는 시기라는 점을 고려할 때 안양천의 적은 어류의 종수 및 개체수는 안양천의 하구가 어류의 이동 또는 서식하기에 부적합한 수환경 상태를 시사한다. 안양천 하구에서의 어류의 개체수의 회복이 지연되는 원인에 대해서는 차후에도 고빈도 수질측정 자료의 지속적인 축적을 통한 예측과 원인 분석을 위한 현장에서의 추가적인 조사가 필요하다.

본 논문에서는 안양천의 유입부인 하구에 서식하는 어종 및 개체수가 빈약한 원인과 매년 어류폐사가 발생하는 원인을 하류지점에 설치한 수질자동측정장치를 통해 간접적으로 예측할 수 있었다. 도심하천인 안양천에서 시행한 고빈도 수질모니터링의 결과는 간헐적인 탁도의 증가와 적은 강우가 내린 직후 발생하는 용존산소농도의 고갈현상이 원인일 가능성이 크다 (Fig. 4). 용존산소농도는 봄과 여름에 일중 강우량이 14 mm 이하일 때 낮아지는 반면, 일중 강우량이 27 mm이었을 때 (2010년 4월)는 오히려 하천의 용존산소농도를 높이고 탁도의 농도를 희석시키는 결과를 보였다.

안양천에서 낮은 용존산소농도를 보이는 시간은 매년 해가 지기 시작하여 다음날 해가 뜨기 직전 사이에서 나타났다 (Fig. 4). Sargent and Galat (2002)는 Missouri 강에서 어류폐사가 발생한 구간에서 낮은 용존산소와 높은 암모니아농도를 새벽에 확인한 바가 있다. 실제적으로 Kim *et al.* (2012)는 안양천에서 용존산소농도의 일주기 변동을 모니터링한 결과에서 밤과 새벽 사이에 용존산소가 최저농도를 보인다고 하였다.

이와 더불어, 안양천에서의 탁도는 2010년 3월 중순과 4월 말 사이에 200~1000 NTU의 높은 농도를 보였는데, 이와 같은 높은 농도의 탁수는 어류의 호흡을 방해하는 원인으로 작용하게 된다 (Sargent and Galat, 2002; Kim *et al.*, 2007b). Sargent and Galat (2002)는 180 NTU의 탁도에서도 어류가 폐사할 가능성이 있음을 제시한 바 있다. Shin *et al.* (2008)은 경북 안동시 갈라산에 서식하는 참갈겨니 (*Zacco koreanus*)를 사육조건에서 고탁도에 노출시켜 조직과 생리현상에 미치는 영향을 파악하였는데, 4일간 고탁도 (300 NTU 이상)에 노출시킨 어류의 아가미, 신장 및 보우만 주머니에 이상이 초래됨을 보였다. 더욱이 고탁도 (1000 NTU)에 노출된 참갈겨니는 체내 중금속의 함량이 높아지는 경향이 있다. 하천 공사로 인한 탁수의 영향으로 서식지가 교란이 될 경우 납자루과와 같이 조개에 산란을 하는 어종은 쉽게 어류군집에서 도태된다고 한다 (Ko *et al.*, 2011).

본 논문은 하천의 복원 및 노후화된 인공구조물의 정비 시에 어류의 보존 또는 관리하는데 중요한 기초정보를 제공해 줄 것으로 사료된다. 한편, 도심하천에서는 실시간 현장의 상황을 모니터링을 할 수 있는 IT (information technology) 분야의 접목을 통한 고빈도 측정 (Kim *et al.*, 2012)을 통해 도심하천에서의 어류폐사 발생의 원인 및 시간 그리고 메커니즘을 이해함으로써 도심하천의 어족자원을 보존 관리하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 본다.

적 요

본 논문은 최근 몇 년 동안 어류폐사가 발생했던 하천인 월운천, 서천, 장남천 그리고 안양천을 대상으로 어종의 변동을 조사하였다. 어류폐사의 영향을 받은 지역에서 종수의 회복률은 22~86%까지 이르렀는데, 인공구조물과 수질에 의한 영향을 받았다. 장남천에서는 알칼리성 pH로 인해 어류폐사가 발생하였으나 다른 두 하천(월운천, 서천)에 비해 수질의 회복 이후 빠른 종수의 회복을 보였다. 또한, 안양천에서의 낮은 종수는 간헐적으로 발생하는 용존산소고갈로 인한 수질악화의 영향이 크다. 이와 더불어 하천에 설치되어 있는 인공구조물은 특히 저서성 어종의 회복에 부정적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 수질 또는 어류개체군의 이동이 회복될 때 어종의 빠른 회복이 예상되지만, 여전히 많은 하천에서 수질의 악화현상과 일부 노후화된 인공구조물의 존재는 어류의 서식환경을 악화시킬 수 있고 어류폐사 이후 하천에서 어종의 회복을 지연시키는 원인이 될 수 있다. 하천에서 어류군집의 보존을 위해서는 어류의 이동을 위한 통로와 유역으로부터의 오염원의 유입을 관리하여야 한다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회 · 국립환경과학원 한강물환경연구소의 2008년도 환경기초조사사업지원과 (재)기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업 및 강원대학교 환경연구소의 지원으로 수행한 연구결과임.

인 용 문 헌

APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.). Ameri-

- can Public Health Association, Washinton DC.
- Cho, Y.M. 2006. A study on emergency management of water contamination accidents. p. 97-103.
- Cohen, G.M. 1977. The influence of cations on chlorine toxicity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **18**: 131-137.
- Cooney, P.B. and T.J. Kwak. 2013. Spatial extent and dynamics of dam impacts on tropical island freshwater fish assemblages. *BioScience* **63**(3): 176-190.
- Durhan, B.W., G.R. Wilds and L.L. Pope. 2006. Temperature-caused fish kill in a flowing great plains river. *The Southwestern Naturalist* **51**: 397-401.
- Ensign, W.E., K.N. Leftwich, P.L. Angermeier and C.A. Dolloff. 1997. Factors influencing stream fish recovery following a large-scale disturbance. *Transactions of the American Fisheries Society* **126**: 895-907.
- Foss, A., T. Vollen and V. Oiestad. 2003. Growth and oxygen consumption in normal and O₂ supersaturated water, and interactive effects of O₂ saturation and ammonia on growth in spotted wol fish (*Anarhichas minor* Ólafsson). *Aquaculture* **224**: 105-116.
- Graczyk, D.J. and W.C. Sonzogni. 1991. Reduction of dissolved oxygen concentration in Wisconsin streams during summer runoff. *Journal of Environmental Quality* **20**: 445-451.
- Han, C.C., K.S. Tew and L.S. Fang. 2007. Spatial and temporal variations of two cyprinids in a subtropical mountain reserve - a result of habitat disturbance. *Ecology of Freshwater Fish* **16**: 395-403.
- Haslouer, S.P. 1979. Natural and pollution-caused fish kills in Kansas during 1978. *Transactions of the Kansas Academy of Science* **82**: 197-204.
- Haslouer, S.P. 1983. Natural and pollution caused fish kills in Kansas during 1979~1980. *Transactions of the Kansas Academy of Science* **86**: 136-143.
- IDNR 2002. Stream fish kill follow-up assessment: fish community sampling results, Iowa Department of Natural Resources, Environmental Protection Division, Water Resources Section. 21p.
- Katz, B.M. 1979. The effects of cations on sodium fluxes in the presence of chlorine. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **21**: 569-575.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2007. Freshwater fishes of Korea. Kyohak Publishing, Seoul.
- Kim, I.S., Y. Choi, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2007a. Illustrated book of Korean fishes. Kyohak Publishing, Seoul.
- Kim, J.K., J.S. Choi, Y.S. Jang, K.Y. Lee and B.C. Kim. 2007b. Effects of turbid water on fish community: Case

- studies of the Daegi Stream and the Bong-san Stream. *Korean Society of Environmental Biology* **40**: 459-467.
- Kim, S.K., Y.I. Kim, S.W. Kang, S.L. Yun and S.J. Kim. 2006. Runoff characteristics of non-point sources on the stormwater. *Environmental Engineering Research* **28**(1): 104-110.
- Kim, S.J., M.S. Shin, J.K. Kim, J.Y. Lee, K.J. Jeong, B.Y. Ahn and B.C. Kim. 2012. Oxygen fluctuation monitored with high frequency in a eutrophic urban stream (the Anyang Stream) and the effect of weather condition. *Korean Journal of Limnological Society* **45**(1): 34-41.
- Ko, M.H., S.J. Moon and I.C. Bang. 2011. Study of the fish community structure and inhabiting status of the endangered species *Gobiobotia macrocephala* and *G. brevibarba* in the Seom River, Korea. *Korean Journal of Limnological Society* **44**: 144-154.
- Kubach, K.M., M.C. Scott and J.S. Bulak. 2011. Recovery of a temperate riverine fish assemblage from a major diesel oil spill. *Freshwater Biology* **56**: 503-518.
- Lee, E.H., D.G. Seo, H.D. Hwang, J.H. Yun and J.H. Choi. 2006. Causes of fish kill in the urban stream I - Field surveys and laboratory experiments. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater* **20**: 573-584.
- Lee, H.J., S.L. Lau, M. Kayhanian and M.K. Stenstrom. 2004. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. *Water Research* **38**: 4153-4163.
- Lee, J.Y., S.J. Yoon, S.J. Lee, J.S. Choi, M.S. Jung and B.C. Kim. 2011. Fish kill caused by washing ginkgo seed coat in a stream. *Korean Journal of Nature Conservation* **5**: 17-22.
- Matthews, K.R. and N.H. Berg. 1997. Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *Journal of Fish Biology* **50**: 50-67.
- Park, T.G., Y.S. Kang, M.K. Seo, C.H. Kim and Y.T. Park. 2008. Rapid detection and quantification of fish killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) in environmental samples using real-time PCR. *Journal of Fisheries Science and Technology* **11**(4): 205-208.
- Rahel, F.J. and W.A. Hubert. 1991. Fish assemblages and habitat gradients in a Rocky Mountain-Great Plains stream: biotic zonation and additive patterns of community change. *Transactions of the American Fisheries Society* **120**: 319-332.
- Raleigh, R.F., D.H. Bennett and L.O. Mohn. 1978. Changes in fish stocks after major fish kills in the Clinch River near St. Paul, Virginia. *The American Midland Naturalist* **99**: 1-9.
- Roh, S.D., D.K. Lee and Y.K. Chun. 2004. A study on the early-stage storm runoff treatment for the reduction of non-point pollution materials on the road. *Korean Society on Water Quality* **20**(5): 525-533.
- Sargent, J.C. and D.L. Galat. 2002. Fish mortality and physicochemistry in a managed floodplain wetland. *Wetlands Ecology and Management* **10**: 115-121.
- Seo, J.W. 2005. Fish fauna and ecological characteristics of dark chub (*Zacco temminckii*) population in the mid-upper region of Gam Stream. *Korean Journal of Limnological Society* **38**: 196-206.
- Seoul Regional Construction Management Administration. 2010. Detailed design of maintenance business in Anyang Stream. p. 62-63.
- Shin, M.J., J.S. Kim, Y.H. Hwang, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008. Effect of turbidity changes on tissues of *Zacco koreanus*. *Korean Journal of Limnological Society* **41**: 73-80.
- Thronson, A. and A. Quigg. 2008. Fifty-five years of fish kills in Coastal Texas. *Estuaries and Coasts* **31**: 802-813.
- Van Hoof, F. and M. Van San. 1981. Analysis of copper, zinc, cadmium and chromium in fish tissues. A tool for detecting metal caused fish kills. *Chemosphere* **10**: 1127-1135.
- Yang, H.C. and S.K. Chun. 1986. Histopathological study of acute toxicity of ammonia on common carp, *Cyprinus carpio*. *Bulletin of the Korean Fisheries Society* **19**(3): 249-256.
- Yoon, J.D., M.H. Jang and G.J. Joo. 2010. Effect of flooding on fish assemblages in small streams in South Korea. *Limnological Society* **12**: 197-203.
- Zeitoun, I.H. 1977. The effect of chlorine toxicity on certain blood parameters of adult rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Environmental Biology of Fishes* **2**: 189-195.

(Manuscript received 8 February 2013,
Revised 20 April 2013
Revision accepted 17 June 2013)