

수온 증가가 한강 수계의 어류 서식지에 미치는 영향

정남일[†] · 박배경 · 김경현

국립환경과학원

Potential Effect of Increased Water Temperature on Fish Habitats in Han River Watershed

Namil Chung[†] · Baekyung Park · Kyunghyun Kim

National Institute of Environmental Research

(Received 20 February 2011, Revised 7 April 2011, Accepted 8 April 2011)

Abstract

The potential effects of increased water temperature on fish assemblages and their habitats were studied in the streams of the Han River watershed when the water temperature was supposed to increase by 1°C, 2°C, and 3°C in each sampling site. The percent changes in suitable habitats for each species and in species number within a site were determined, based on the estimated maximum thermal tolerances of 51 fish species whose habitats were classified into four reaches: upstream, up-/midstream, midstream, and mid-/downstream. The maximum thermal tolerance ranged between 25.0°C and 31.0°C and significantly increased as the habitat reaches move from upstream to mid-/downstream. With the increases in water temperature, the average suitable habitats for all 51 species were decreased by 31% (+1°C), 46% (+2°C), and 60% (+3°C). The increased water temperature, however, did not induce significant differences in the changes in suitable habitats among four reaches within each level of temperature increase. The relative frequencies of the sampling sites classified into six levels according to the percent change in the number of species in each site were significantly different among three levels of water temperature increase, with relatively greater changes in the sites where 0~20% and 61~100% of species were affected.

keywords : Fish assemblage change, Han River watershed, Maximum thermal tolerance, Suitable habitat, Water temperature increase

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체는 4차 기술보고서에서 1906~2005년 동안 지구 표면의 온도가 0.74°C (범위 0.56~0.92°C) 상승하였으며, 이러한 전지구적 기온 증가는 수환경의 다양한 변화와 연계되어 있다고 보고하였다(Bates et al., 2008). 기후변화가 하천 생태계에 미치는 영향을 예측하는 것은 미래 기후변화 방향의 불확실성과 생태학적 결과 예측의 어려움으로 인해 쉽지 않은 일이지만(Allan, 1995), 하천 생태계가 다양한 이화학적 요인들에 의해 영향 받는 것을 고려하면 기후변화에 따른 유량의 변화와 수질 및 수온의 변화가 하천 생태계의 서식 환경을 변화시킴으로써 하천의 생물 군집에 영향을 미칠 것이 예상된다.

최근의 연구 결과들은 장기적인 수온 증가는 기온 상승과 상관성이 있으며(Hari et al., 2006; Kaushal et al., 2010), 기후변화가 주로 수온 상승을 통해 수생태계의 생물상에 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다. 미국의 20개 주요 하천에서는 연간 평균 수온이 0.009~0.077°C 증가하였

으며(Kaushal et al., 2010), Morrill 등(2005)은 13개국의 43개 하천의 자료를 분석하여 기온이 1°C 상승함에 따라 수온이 0.6~0.8°C 상승하였음을 보였다. 국내 하천의 경우, 기온 1°C 상승에 따른 평균 수온의 증가폭이 0.752~0.838°C에 이르는 것으로 분석되었으며, 장래 기온 변화에 따른 잠재적 수온 변화는 2008년 대비 전체 평균 수온이 2050년까지 1.06°C, 2100년까지 2.45°C 상승하는 것으로 예측되었다(김익재 등, 2009).

수온 상승은 수체 내의 용존 산소 농도를 감소시켜 용존 산소가 풍부하며 수온이 낮은 서식처를 선호하는 냉수성 종들이 상대적으로 고수온의 낮은 용존 산소 상태에 적응한 종들로 대체되는 효과를 야기함으로써(Mohseni et al., 2003; Reiger and Meisner, 1990) 생물종의 분포에 변화를 일으키고, 고위도 지역으로 이동할 수 없는 종들은 최소한 지역적으로 사멸할 것이다(Allan, 1995). 스위스 고산지 하천에서는 25년간의 기온 변화에 따른 수온 증가와 함께 송어의 어획량이 감소하였는데, 이는 적합 서식지의 감소 및 상류의 대체 서식지로의 이동이 물리적 장벽에 의해 저해됨으로써 송어 군집의 크기가 감소된 결과였다(Hari et al., 2006). 론강에서의 장기적인 어류 군집 모니터링의 결과 냉수성 어류(황어 등)가 온수성 어류(잉어류)에 의해 대체되

[†] To whom correspondence should be addressed.

namilchung@gmail.com

었는데, 이러한 군집 구조와 서식처 분포의 변화는 1.5°C의 수온 변화에 의해 초래되었다(Daufresne et al., 2004).

어류는 어업 및 여가 활동, 환경 영향 평가, 생태학적 연구 대상으로서 그 중요성이 인식되어 왔으며, 수질 및 수생태계 모니터링에 빈번히 활용되고 있다(Bayley and Li, 1992; Simon, 1999). 어류 군집은 기온 상승에 따른 수온 증가에 특히 취약한데, 이는 어류가 체온 조절 능력이 없어 수온의 변화에 매우 민감히 반응하기 때문이다(Welch et al., 2004; Wood and McDonald, 1997). 온도구배에 따른 담수 어류의 지리적 분포는 각 어류 종의 내성 온도 범위에 의해 결정되는데, 특히 냉수성 어종들은 수온 증가에 보다 민감하여 내성 한계를 초과하는 수온 분포를 보이는 서식처로부터 지역적으로 사멸하거나 상류의 수온이 낮은 서식처로 이동해야하므로 온수성 어종보다 심각한 영향을 받을 수 있다(Rahel et al., 1996; Stefan et al., 2001).

기후변화에 따른 온난화의 어류 서식지에 대한 영향을 통합적으로 평가하기 위한 방법의 하나로 기후 모델과 수온 자료를 결합하여 기후 변화가 하천의 수온에 미치는 영향을 예측하고, 이를 활용하여 개별 서식지에서 최대 수온 변화에 따른 어류의 서식 적합성을 평가하는 방법이 제시되었다. Eaton and Scheller (1996) 및 Mohseni 등(2003)은 지리정보시스템을 이용하여 지역의 어류상과 수온 자료를 연계함으로써 어류종별 최대 내성 온도를 산정하고, 이를 기후변화 모델링 결과에 따른 서식지별 수온 변화와 비교함으로써 어류종별 적합서식지 수의 변화를 평가하였다. Eaton and Scheller (1996)는 CO₂ 농도가 2배로 증가하였을 때 냉수성 어류(cold water fish)는 47%, 약냉성 어류(cool water fish)는 50%, 온수성 어류(warm water fish)는 14%의 적합 서식지가 감소하는 것으로 분석하였다.

국내에서도 기후변화로 인한 지구온난화가 담수어류의 지리적 분포 변화와 종다양성 감소 등에 중요한 변화를 야기할 것이 예상되나(주기재 등, 2008), 이에 대한 수계 단위의 정량적 분석이나 예측은 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 수온 상승이 담수어류 군집의 서식지 분포에 미치는 영향을 유역 단위에서 분석하고자 한다. 이를 위하여 각 어종별 최대 내성 온도를 추정하고 단계별 수온 증가에 따른 적합 서식지 변화율 및 종수의 상대적 변화율을 산정하였다. 수온 외에 어류의 분포에 영향을 미치는 다른 조건들(예, 미소서식처의 형태, 수리학적 조건 등)은 수온 상승 전후에 동일하다고 가정하였다.

2. 연구 방법

2.1. 어류 군집 및 수온 자료 수집

환경부의 2007~2009년 수생태계 건강성 조사·평가 사업의 결과 중 어류상 조사 자료와 전국 수질측정망의 하천수 수질 데이터베이스(물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr>)를 통해 수온 자료를 수집하였다. 수온 자료 수집은 수질 측정망 운영계획(환경부, 2010)을 바탕으로, 2007~2009년 동안 조사된 한강 수계의 하천들을 대상으로 하였으며 호

소는 제외하였다. 2007년 또는 2008년에만 조사되어 연속적인 조사가 이루어지지 않은 수생태계 조사 지점들은 어류상 수집 대상에서 제외하였다. 분석 대상 어류는 흐름이 있는 하천 구간을 주 서식지로 삼는 유수성 어종들을 선택하여 상류(upstream), 상/중류(up-/midstream), 중류(midstream) 및 중/하류(mid-downstream) 유역에 서식하는 종으로 구분하였다. 정수성 및 기수성, 회유성 어종들과 외래종은 분석 대상에 포함시키지 않았다. 어류의 군집 구조는 하천의 수온 구배의 영향을 받지만(Cushing and Allan, 2001; Halliwell et al., 1999), 국내에 서식하는 어류들은 일부 산지 하천에 적응한 종들을 제외하고는 수온에 따른 하천의 구분(냉수성, 약냉성, 온수성)에 엄밀히 따르지 않는 경우가 많으므로 어종별 주요 서식 구간으로 구분하였다. 서식처에 따른 어류의 구분은 국립환경과학원(2006b, 2009)을 따랐다. 총 5 회에 걸친 수생태계 조사기간 동안 연속적으로 관찰되지 않거나 한 개 지점에서만 채집된 경우 및 출현 개체수가 극히 적은 어종의 자료는 수집하지 않았다. 수집된 수온 및 어류 군집 자료는 조사지점별, 어종별로 코드를 부여하여 구분하였다. 분석 대상 어류는 총 51 종이 선정되었다(Table 1).

2.2. 어류상 자료와 수온 자료의 결합

어류상 조사 지점과 수온 측정 지점을 시공간적으로 결합하여 어류/수온 자료쌍으로 조합하였다(Eaton et al., 1995; Eaton and Scheller, 1996). 자료의 수집과 분석을 위한 전반적인 과정은 Fish and Temperature Database Matching System (Eaton et al., 1995) 및 국립환경과학원(2006a)을 참고하였다. 수질 측정 지점 및 어류 군집 조사 지점의 경위도 좌표를 변환하여 지리정보시스템을 이용하여 표시한 후, 어류상 조사 지점과 수온 측정 지점 간의 거리가 1.5 km 이내인 두 지점을 하나의 조사 구간에 속하는 것으로 조합하였다. 각 어류 조사 지점은 수온 측정 지점과 동일한 하천에 위치해야 하며 두 지점 사이에 다른 하천이 합류하지 않아야 한다는 조건을 만족시키는 지점들만 선택하였다. 호수의 수변 구역 근처에 위치하거나 거리 및 위치 조건을 만족시키는 수온 조사 지점이 없는 어류 조사 지점들은 삭제되었다. 좌표 변환 이후에 표시된 조사 지점이 불명확하거나, 조사 하천명과 다른 지점에 표시된 어류상 조사 지점들 및 수온 측정 지점들도 삭제하였다. 사용 가능한 어류/수온 자료쌍은 총 208 개로 조사되었다(Fig. 1). 특정 조사 구간 내에서 동일 년도에 기록된 어류 군집 자료와 수온 자료를 하나의 자료쌍으로 결합하여, 각 어류 종별로 3 년간 관찰된 모든 조사 구간의 수온 자료를 물환경정보시스템에서 추출하여 데이터베이스화 하였다. 수집된 수온 자료들을 검사하여 비정상적인 측정치일 가능성이 있거나 이상치로 판단되는 값들은 삭제하였다. 분석 대상 어류의 종별 전체 서식지의 연중 수온 변이는 6~8월에 최고 수온에 도달하는 양상을 보였다. Fig. 2에 대륙종개(*Orthrias nudus*)의 어류/수온 자료쌍을 예시하였다.

Table 1. The 51 species of freshwater fishes used in the analysis, with the maximum thermal tolerance estimated, the number of thermally suitable habitats without the influence of warming, and the percent changes in suitable habitats assumed the increases in water temperature by 1°C, 2°C, and 3°C in each sampling site.

Species	Maximum thermal tolerance	# Suitable habitats	% Habitat change		
			+1°C	+2°C	+3°C
Upstream					
<i>Cottus koreanus</i>	25.0	8	-37.5	-62.5	-100.0
<i>Ladislavia taczanowskii</i>	26.0	16	-25.0	-43.8	-50.0
<i>Phoxinus phoxinus</i>	26.2	5	-40.0	-40.0	-40.0
<i>Oncorhynchus masou masou</i>	26.2	9	-33.3	-55.6	-66.7
<i>Liobagrus mediadiposalis</i>	26.8	4	-75.0	-75.0	-75.0
<i>Rhynchocypris kumgangensis</i>	27.0	14	-28.6	-42.9	-50.0
<i>Rhynchocypris steindachneri</i>	28.0	10	-30.0	-40.0	-50.0
<i>Silurus microdorsalis</i>	28.0	10	-30.0	-40.0	-60.0
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	28.0	71	-22.5	-38.0	-46.5
<i>Iksookimia koreensis</i>	28.0	105	-27.6	-41.9	-55.2
<i>Orthrias nudus</i>	28.1	64	-28.1	-37.5	-42.2
<i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	28.7	89	-36.0	-48.3	-59.6
<i>Gobiobotia brevibarba</i>	29.0	25	-40.0	-60.0	-60.0
Up-/midstream					
<i>Orthrias toni</i>	27.9	17	-17.6	-29.4	-41.2
<i>Hamibarbus mylodon</i>	28.0	20	-50.0	-70.0	-70.0
<i>Pseudopungtungia tenuicorpa</i>	28.0	34	-44.1	-58.8	-70.6
<i>Liobagrus andersoni</i>	28.0	72	-33.3	-40.3	-52.8
<i>Microphysogobio longidorsalis</i>	28.0	76	-38.2	-48.7	-55.3
<i>Zacco koreanus</i>	28.0	94	-37.2	-51.1	-64.9
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	28.1	96	-43.8	-54.2	-63.5
<i>Gobiobotia macrocephala</i>	29.0	14	-35.7	-42.9	-64.3
<i>Odontobutis platycephala</i>	29.0	15	-26.7	-40.0	-40.0
<i>Rhinogobius brunneus</i>	29.0	117	-25.6	-44.4	-58.1
Midstream					
<i>Siniperca scherzeri</i>	28.0	14	-28.6	-50.0	-57.1
<i>Acheilognathus signifer</i>	28.0	32	-37.5	-56.3	-68.8
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	28.0	34	-32.4	-35.3	-52.9
<i>Sarcocheilichthys variegatus</i>	29.0	19	-42.1	-68.4	-84.2
<i>Rhodeus uyekii</i>	29.0	26	-19.2	-38.5	-69.2
<i>Pseudobagrus koreanus</i>	29.0	36	-27.8	-47.2	-61.1
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	29.0	66	-19.7	-39.4	-47.0
<i>Coreoperca herzi</i>	29.0	74	-32.4	-48.6	-56.8
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	29.0	88	-31.8	-45.5	-53.4
<i>Hamibarbus longirostris</i>	29.0	111	-27.9	-43.2	-56.8
<i>Pungtungia herzi</i>	29.0	132	-26.5	-43.9	-57.6
<i>Gnathopogon strigatus</i>	29.7	26	-34.6	-57.7	-76.9
Mid-/downstream					
<i>Microphysogobio jeoni</i>	27.0	5	-40.0	-40.0	-100.0
<i>Cobitis pacifica</i>	28.0	5	-40.0	-60.0	-80.0
<i>Abbottina springeri</i>	28.0	8	-25.0	-62.5	-62.5
<i>Tridentiger brevispinis</i>	28.0	36	-30.6	-55.6	-63.9
<i>Misgurnus mizolepis</i>	28.2	17	-29.4	-52.9	-64.7
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	29.0	10	-50.0	-50.0	-60.0
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	29.0	17	-17.6	-23.5	-29.4
<i>Abbottina rivularis</i>	29.0	20	-25.0	-40.0	-65.0
<i>Rhodeus notatus</i>	29.0	21	-19.0	-33.3	-52.4
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	29.0	29	-31.0	-34.5	-55.2
<i>Odontobutis interrupta</i>	29.0	85	-22.4	-41.2	-58.8
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	29.0	95	-23.2	-42.1	-56.8
<i>Pseudogobio esocinus</i>	29.0	150	-26.0	-44.7	-61.3
<i>Zacco platypus</i>	29.0	195	-28.2	-48.2	-64.6
<i>Hemiculter leucisculus</i>	30.0	6	-16.7	-16.7	-50.0
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	31.0	16	-25.0	-37.5	-43.8

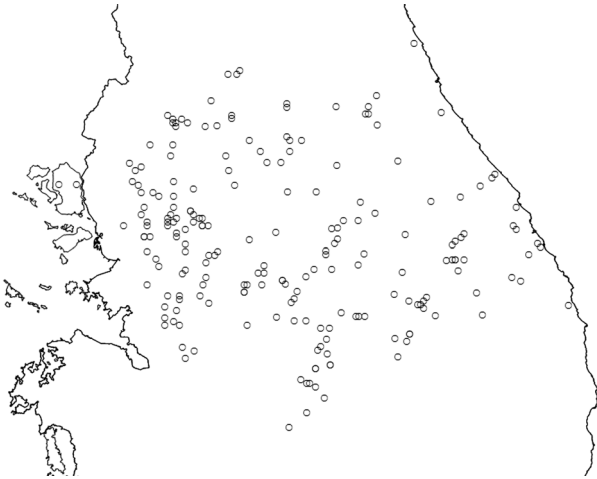


Fig. 1. Locations of 208 sampling sites used to study fish habitats and water temperature in the Han River watershed.

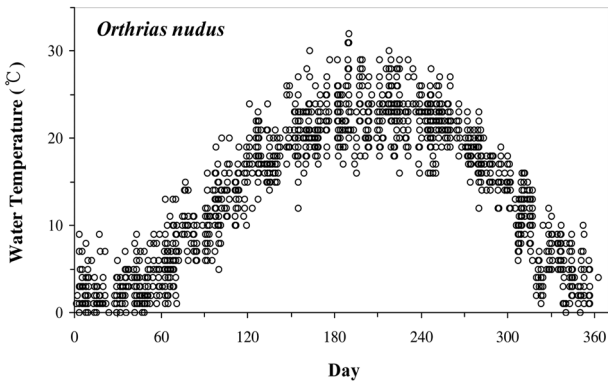


Fig. 2. An example of fish/temperature dataset for *Orthrias nudus* during 2007~2009 in the Han River watershed.

2.3. 어류 종별 최대 내성 온도 및 서식처 적합성

각 어류 종별로 구축된 수온 자료 데이터베이스를 이용하여 종별 최대 내성 온도(maximum thermal tolerance)를 추정하였다. 유효하지 않은 수온 값이 검출되지 않고 원본 자료에 포함되어 있을 가능성을 고려하여, 최고 온도 대신에 종별 전체 수온 자료의 99 분위수에 해당하는 수온 값을 특정 어류종의 최대 내성 온도로 산정하였다. 출현 지점수가 매우 제한적인 일부 종들은 분석 대상에서 제외하였다.

하천의 수온이 최대를 상승하는 하절기(6~8월)의 최고 수온이 전체 조사 구간에서 각각 1°C, 2°C 및 3°C 상승하였다고 가정하였을 때, 개별 조사 구간의 변화된 최고 수온을 어류 종별 최대 내성 온도와 비교하였다. 수온 상승치는 한강 수계의 하천들에서 2008~2050년 동안 평균 1.87°C, 2008~2100년 동안 평균 3.16°C 상승하는 것으로 예측된 결과를 참고하여 결정하였다(김익재 등, 2009). 각 종별로 최대 내성 온도를 초과하는 최고 수온 예측치를 가지는 조사 구간은 6~8월 기간 동안 특정 어류의 서식지로 적합하지 않은 것으로 판정하여, 전체 서식지에 대한 부적합 서식지의 비율을 산정하였다(Eaton and Scheller, 1996). 각 조사 구간

에 대하여 하절기 동안 최고 수온이 상승함에 따라 서식 부적합으로 판정되는 어류종의 비율을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온 상승에 따른 어류 서식지 변화

전 유역에서의 수온 상승이 한강 수계의 우수성 어종들의 서식지에 미치는 잠재적 영향을 각 어류종의 최대 내성 온도와 함께 Table 1에 나타내었다. 각 하천 유역 내에서 수온이 상승함에 따라 적합 서식지의 비율이 감소하였다(모든 유역에서 $P < 0.05$; Fig. 3). 상류에 서식하는 어류들은 수온이 1°C 상승하였을 때 평균 34.9%, 2°C 상승하였을 때 48.1%, 3°C 상승하였을 때 58.1%의 적합 서식지가 감소하는 것으로 분석되었다. 상/중류에 서식하는 종들은 단계적 수온 상승에 따라 각각 35.2%, 48.0%, 58.1%의 적합 서식지가 감소하는 것으로 나타나 상류 서식종들과 유사하였다. 상류 유역에서 수온이 3°C 증가하였을 때의 적합 서식지 감소율은 1°C 증가하였을 때보다 높았으나, 2°C 증가하였을 경우에는 1°C 및 3°C 증가시와 차이가 없었다($P < 0.05$). 상/중류 유역에서 수온이 2~3°C 증가하였을 때는 1°C 증가하였을 때보다 더 큰 비율로 적합 서식지가 감소하였으나, 3°C 상승하는 경우는 2°C 증가시와 차이가 없었다($P < 0.001$). 중류 및 중/하류에 서식하는 종들에 대해서는 수온이 1°C씩 증가할 때마다 적합 서식지가 유의하게 감소하였다(중류 $P < 0.005$; 중/하류 $P < 0.01$).

중류에 서식하는 어류들은 수온이 1~2°C 상승한다고 가정하였을 때는 상류 및 상/중류에 서식하는 종들보다 적합 서식지 감소율이 다소 낮았으나(30.0% 및 47.8%), 3°C 상승할 때는 보다 높은 감소율(61.8%)을 보였다. 이러한 경향은 중/하류에 서식하는 종들에서도 유사하게 관찰되었다

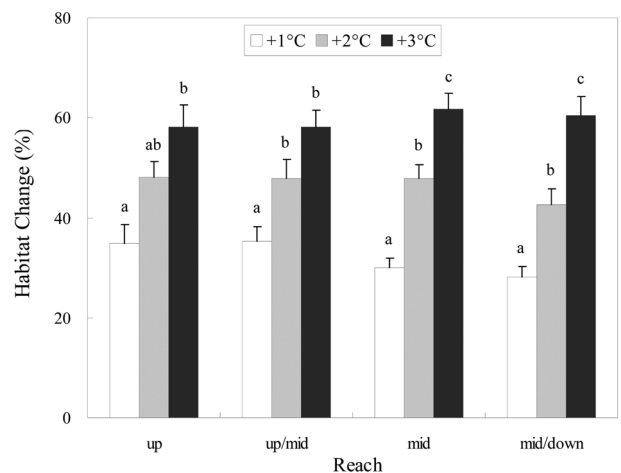


Fig. 3. Average percent habitat change for fishes inhabiting upstream, up-/midstream, midstream, and mid-/downstream reaches with water temperature increases of 1°C, 2°C, and 3°C. Significant differences($P < 0.05$) in habitat change among different temperature increases within each reach were indicated by different letters. Error bars indicate 1 standard error.

(Fig. 3). 이는 수온이 낮고 용존산소가 풍부한 상류 유역에 서식하는 종들이 1~2°C의 수온 상승에도 상대적으로 큰 영향을 받을 수 있음을 암시한다. 그러나, 수온 상승에 따른 적합 서식지의 변화율에 하천 유역 구분(상류, 상/중류, 중류, 중/하류)은 영향을 미치지 않았다(1°C 증가 $P=0.18$; 2°C 증가 $P=0.50$; 3°C 증가 $P=0.90$).

Eaton and Scheller (1996) 및 Mohseni 등(2003)의 연구에서는 기온 증가의 영향 하에서도 일부 온수성 어종들은 적합 서식지가 증가하는 것으로 예측되었는데, 본 연구에서 그러한 결과는 관찰되지 않았다. Eaton and Scheller (1996)는 최대 내성 온도가 30°C 이상인 종들을 온수성으로 분류하였다. 본 연구에 포함된 종들 중에서 치리(*Hemiculter eigenmanni*)와 살치(*Hemiculter leucisculus*)의 최대 내성 온도가 각각 31.0°C와 30.0°C로 분석되었으나, 적합 서식지 비율은 수온 증가와 함께 감소되었다. 그러나 감소율은 중/하류에 서식하는 것으로 분류된 다른 종들에 비해 상대적으로 적었다.

주기재 등(2008)은 특히 한강 수계에 서식하는 열목어, 금강모치, 독중개 및 한독중개 등의 분포가 수온 증가와 함께 매우 제한될 것으로 예상하였는데, 본 연구에서도 독중개(*Cottus koreanus*) 및 돌상어(*Gobiobotia brevibarba*), 자가사리(*Liobagrus mediadiposalis*), 산천어(*Oncorhynchus masou*) 등의 서식지가 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 1). 이는 이 종들의 서식지 수가 상대적으로 적고, 최대 내성 온도가 비교적 낮기 때문인 것으로 판단된다. 독중개는 51 종의 분석 대상 어류들 중에서 가장 낮은 25.0°C의 최대 내성 온도를 보였고, 산천어는 26.2°C, 자가사리는 26.8°C, 돌상어는 상류에 서식하는 어류들 중 가장 높은 29.0°C의 최대 내성 온도를 나타내는 것으로 추정되었다.

대기중 CO₂ 농도가 2배 증가하면 미국의 하천들에서 주 평균 수온이 2~4°C 증가하고, 주 최대 수온은 1~3°C 증가할 것으로 예측되었다(Mohseni et al., 2003). 그러한 조건 하에서 모든 어류 종들은 Eaton and Scheller (1996)의 연구 결과에 비해 적합 서식지 감소율이 적은 것으로 분석되었다. 차이는 특히 약냉성 어종과 온수성 어종들에서 상대적으로 크게 나타났는데, 냉수성 어종은 평균 36.4%의 적합 서식지가 감소하였고, 약냉성 어종은 평균 14.8%, 온수성 어종은 평균 1.2%의 감소율을 보였다. 본 연구에서는 전체 51 종의 어류에 대해 평균 31.7~59.7%의 적합 서식지가 감소하는 것으로 예측되었다.

각 어류종의 최대 내성 온도는 상류 유역에서 하류 유역으로 서식지가 이동할수록 점차 증가하는 경향을 보였다($F=9.20$, $P<0.001$). Eaton and Scheller (1996)의 연구에서 냉수성 어종들의 내성 한계 온도 범위는 19.8~24.3°C, 약냉성 어종들은 26.5~29.6°C의 범위를 보였으며, 온수성 어종들은 30.1~36.0°C의 범위를 나타내었다. 본 연구에서는 독중개와 치리 및 살치를 제외한 모든 종들의 최대 내성 온도가 26.0~29.7°C의 범위에 속하는 것으로 산정되었다. Eaton 등(1995)은 비모수적 부트스트랩 기법(Efron and Gong, 1983)을 적용하여 30 종의 최대 내성 온도 추정치의

표준오차를 계산하였는데, 1 종을 제외한 29 종에 대해서 0.06~0.78의 범위를 보였다. 본 연구에 사용된 어류/수온 자료쌍에 대해 동일한 기법을 적용하였을 때 모든 종의 표준오차 값은 0.0에 매우 근사하였다. 이는 물환경정보시스템에서 제공하는 수온 자료가 모두 정수값으로 입력되어 있어 최대 내성 온도와 동일한 값들이 다수 존재하기 때문인 것으로 사료되며, 최대 내성 온도 추정 및 적합 서식지 변화 판정에 불확실성을 유발할 수 있다. 매 조사일에 1회 측정되어 수온의 일변화가 반영되어 있지 않은 점 또한 최대 내성 온도 추정의 불확실성을 더한다.

본 연구에서 분석된 모든 어종의 최저 내성 온도는 0°C로 동일한 것으로 가정하여 고려하지 않았으나, Mohseni 등(2003)은 약냉성 및 온수성 어류의 서식지 적합성을 결정하기 위해 최대 내성 온도와 함께 최저 내성 온도를 고려하였다. 최저 내성 온도를 0°C로 설정하였을 때 약냉성 및 온수성 어종의 적합 서식지가 감소하였으나, 최저 내성 온도가 2°C로 설정되었을 때의 적합 서식지는 약냉성 어종이 평균 12.4%, 온수성 어종은 평균 31.4% 증가하였다. 이러한 결과는 일부 온수성 어종의 적합 서식지가 증가하는 것으로 분석한 Eaton and Scheller (1996)의 결과와 일치하며, 기후 변화에 의한 어류의 지리적 분포 변화 예측에 정확한 최저 내성 온도를 적용하는 것이 중요한 변수가 될 수 있음을 시사한다.

3.2. 어류 군집 변화

수온이 증가하였을 때 변화된 최고 수온의 영향으로 각 조사 구간에서 제거되는 종의 비율을 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 단계별 수온 증가에 따라 각 서식지에서 영향을 받을 것으로 예상되는 어류 종수의 비율은 수온 증가폭에 따라 다르게 나타났다($P<0.05$, Fig. 7). 수온이 1°C 증가한다고 가정하였을 때 102개 서식지에서 일부 혹은 전체 어류들이 서식 적합성을 상실하는 것으로 예측되었다(Fig. 4). 특정 조사 구간에 서식하는 종들의 81% 이상이 대체 서식지로 이동하거나 사멸할 것으로 예상되는 서식지는 30개로 나타났으며, 21~80%의 어류 종들이 영향을 받을 것으로 예상되는 서식지는 49개였다. 2°C의 수온 증가를 가정하였을 때 종수의 변화가 예상되는 서식지의 수는 139개로 증가하였다(Fig. 5). 이러한 변화는 61% 이상의 어류 종들이 영향을 받을 것으로 예상되는 서식지의 수가 1°C 증가시에 비해 2배 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 전체 출현종이 영향을 받을 것으로 예상되는 서식지의 수도 2배 증가하였다. 수온이 3°C 증가하는 경우에는 61% 이상의 출현 어류종이 영향을 받는 서식지의 수가 120개로, 1°C 증가시 대비 2.5배 높게 나타났다(Fig. 6). 관찰된 종의 21~60%가 영향을 받을 것으로 예상되는 서식지의 수는 수온 증가폭에 상관없이 상대적으로 일정하였으나, 20% 이하의 출현종들이 영향을 받는 서식지의 수는 크게 감소하였다(Fig. 7).

각 서식지에서 수온이 상승함에 따라 서식 적합성에 영향을 받는 어류의 종류와 종수는 지류와 본류 및 상류와

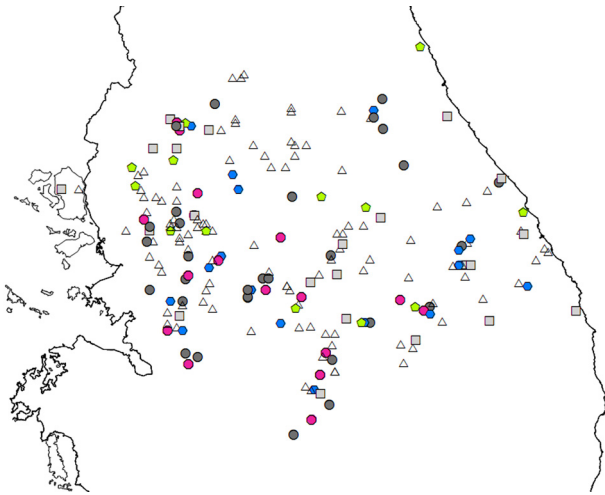


Fig. 4. Percent decreases in the number of fish species observed in each of 208 sampling sites in the Han River watershed after water temperature increased by 1°C during summer season. Triangle (open)=0%, square (light gray)=1~20%, pentagon (green)=21~40%, hexagon (blue)=41~60%, octagon (purple)=61~80%, circle (charcoal)=81~100%.

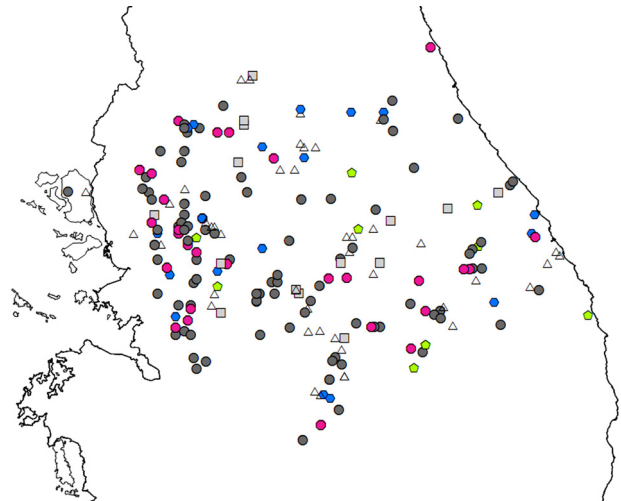


Fig. 6. Percent decreases in the number of fish species observed in each of 208 sampling sites in the Han River watershed after water temperature increased by 3°C during summer season. Triangle (open)=0%, square (light gray)=1~20%, pentagon (green)=21~40%, hexagon (blue)=41~60%, octagon (purple)=61~80%, circle (charcoal)=81~100%.

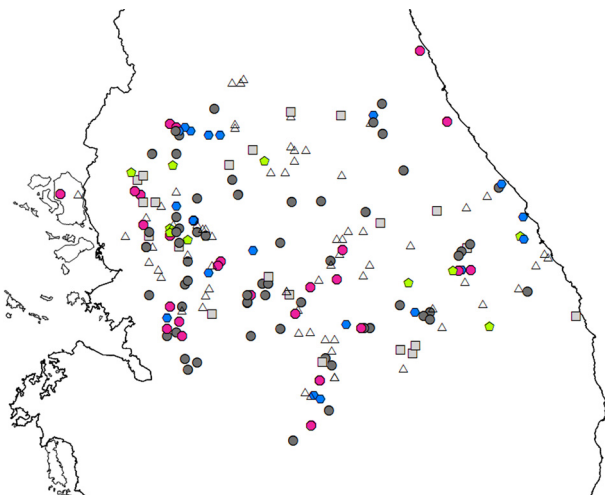


Fig. 5. Percent decreases in the number of fish species observed in each of 208 sampling sites in the Han River watershed after water temperature increased by 2°C during summer season. Triangle (open)=0%, square (light gray)=1~20%, pentagon (green)=21~40%, hexagon (blue)=41~60%, octagon (purple)=61~80%, circle (charcoal)=81~100%.

하류에서 다양하게 나타났다. 하천 수계의 수온 변동은 유량과 수심, 위도와 고도, 식생의 유무 및 지하수 유입 등에 의해 영향을 받으며, 지류와 본류에서 수온 변동의 정도가 다르게 나타나므로(Cushing and Allan, 2001; Walling and Webb, 1992), 각 조사 구간에서 관찰되는 최대 수온은 한 하천 내에서도 변이를 보일 수 있다. 일반적으로 어류의 분포와 군집 구조는 하상구성물의 입자 크기, 용존산소 농도, 하안의 안정성, 하천변 식생, 유속, 유량 및 수심 등을 포함하는 서식처의 특성에 의해서도 영향을 받는 것으로

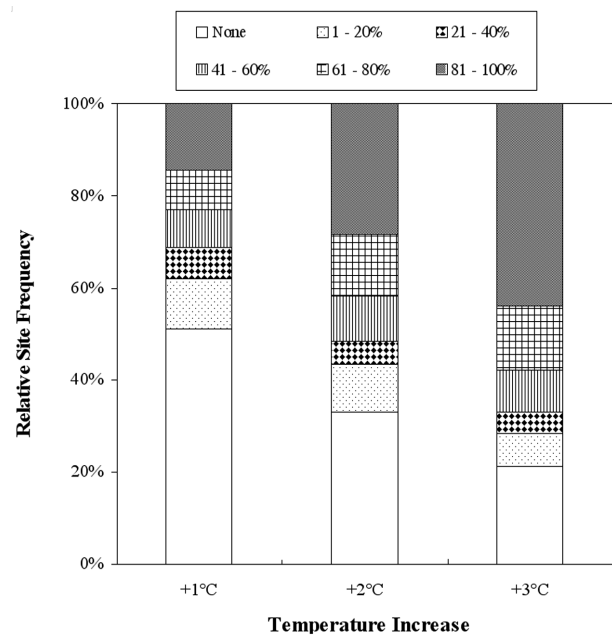


Fig. 7. Relative proportion of site frequency classified into 6 levels according to the percent change in the number of fish species in each site after water temperature increased by 1°C, 2°C, and 3°C.

알려져 있다(Cushing and Allan, 2001; Reeves et al., 1998). 그러한 수온 변동 및 서식지 특성의 변이는 본 연구에서 고려되지 않았다. 최대 수온 변화에 대한 어류의 내성 한계와 분포 변화를 보다 정확히 예측하기 위해서는 어류 서식지에 대한 상세한 분석 및 모델링(Mohseni et al., 2003)과 개별 종의 생장에 관한 열생물학적 정보가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

한강 수계의 하천들에 서식하는 어류들의 최대 내성 온도를 산정하고, 이른 바탕으로 각 조사구간에서 수온이 1°C, 2°C 및 3°C 증가한다고 가정하였을 때 어류 군집의 적합 서식지의 변화율을 산정하였다. 전체 조사구간에 대하여 출현종수의 변화율을 예측하였으며, 이른 통해 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 51 종의 어류에 대하여 최대 내성 온도는 25.0~31.0°C의 범위를 보이는 것으로 조사되었다. 독중개(*C. koreanus*)의 최대 내성 온도가 가장 낮았으며, 치리(*H. eigenmanni*)가 가장 높은 최대 내성 온도를 보이는 것으로 분석되었다.
- 2) 분석 대상 어종들을 주 서식지에 따라 상류, 상/중류, 중류 및 중/하류 유역으로 구분하였을 때, 종별 최대 내성 온도는 상류 유역에서 하류 유역으로 서식지가 이동함에 따라 점차 증가하였다.
- 3) 51 종의 어류에 대해 수온이 1°C 증가하였을 때 평균 31%, 2°C 증가하였을 때는 평균 46%, 3°C 증가하였을 때는 평균 60%의 비율로 적합 서식지가 감소되었다.
- 4) 각 주요 서식지 유역(상류, 상/중류, 중류, 중/하류) 내에서 어류 적합 서식지의 비율은 수온 상승에 따라 감소하였다. 중류 및 중/하류 유역에서는 수온이 1°C, 2°C 및 3°C 증가하였을 경우 모두 차이를 나타내었으나, 상/중류 유역에서는 2°C 수온 증가와 3°C 증가 간에 적합 서식지 감소율에 차이가 없었다. 상류 유역에서는 2°C 증가시 1°C 및 3°C 증가한 경우와 차이가 없었다.
- 5) 수온이 1~2°C 상승할 경우 상류 및 상/중류에 서식하는 어류 종들의 적합 서식지가 중류 및 중/하류에 서식하는 종들의 적합 서식지보다 5~7% 더 많이 감소되었다. 수온이 3°C 상승할 때는 중류 및 중/하류에 서식하는 종들의 적합 서식지가 상류 및 상/중류에 서식하는 종들의 적합 서식지보다 3~4% 더 많이 감소되었다. 그러나 각 수온 증가 수준(1°C, 2°C, 3°C)에 대해 서식지 유역간의 적합 서식지 변화율은 통계적으로 유의한 차이가 없었다.
- 6) 각 서식지에서 최대 수온이 단계적으로 증가함에 따라 서식 적합성에 영향을 받는 어류 종수의 비율은 수온 증가폭에 따라 차이를 보였다. 전혀 영향을 받지 않거나 출현종들의 20% 이하가 영향을 받을 것으로 예측된 서식지의 비율은 수온 증가에 따라 62% (1°C)에서 43% (2°C) 및 30% (3°C)로 감소하였다. 반면에 61% 이상의 종들이 영향을 받는 서식지의 비율은 각각 13%에서 42% 및 57%로 증가하였다. 특히 모든 출현종들의 서식 적합도가 영향을 받지 않는 서식지 및 출현종의 100%가 영향을 받는 서식지의 비율이 큰 폭으로 변화하였다. 21~ 60%의 출현종이 영향을 받는 서식지의 비율은 상대적으로 변화가 적었다.

사 사

본 연구는 환경부의 환경분야 영향 및 취약성 평가(수질/

수자원) 연구사업 및 국립환경과학원 박사후연수과정 지원 사업에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 국립환경과학원(2006a). 수환경에 따른 수생생물의 분포특성 연구. NIER No. 2006-39-821.
- 국립환경과학원(2006b). 제3차 전국자연환경조사 지침.
- 국립환경과학원(2009). 쉬리야, 꼬치동자개를 보았니? 우리 하천의 우리 물고기 사진집(1), 환경부.
- 김익재, 안종호, 한대호(2009). 기후변화 대응을 위한 물환경 관리전략 및 정책방향 I. 연구보고서 2009-13, 한국환경정책·평가연구원.
- 주기재, 김동균, 윤주덕, 정광석(2008). 기후변화와 담수 생태계: 변화와 대응. *대한환경공학회지*, **30**(12), pp. 1190-1196.
- 환경부(2009). 물환경정보시스템. <http://water.nier.go.kr/>.
- 환경부(2010). 수질측정망 운영계획.
- Allan, J. D. (1995). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., and Palutikof, J. P. (2008). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Secretariat, Geneva, Swiss.
- Bayley, P. B. and Li, H. W. (1992). Riverine fishes. *The Rivers Handbook: Hydrological and Ecological Principles*, P. Calow, and G. E. Petts (eds.), **1**, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, pp. 251-281.
- Cushing, C. E. and Allan, J. D. (2001). *Streams: Their Ecology and Life*, Academic Press, Orlando, Florida, USA.
- Daufresne, M., Roger, M. C., Capra, H., and Lamouroux, N. (2004). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climate factors. *Global Change Biology*, **10**(1), pp. 124-140.
- Eaton, J. G. and Scheller, R. M. (1996). Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. *Limnology and Oceanography*, **41**(5), pp. 1109-1115.
- Eaton, J. G., McCormick, J. H., Goodno, B. E., O'Brien, D. G., Stefany, H. G., Hondzo, M., and Scheller, R. M. (1995). A field information-based system for estimating fish temperature tolerances. *Fisheries*, **20**(4), pp. 10-18.
- Efron, B. and Gong, G. (1983). A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. *American Statistician*, **37**(1), pp. 36-48.
- Halliwell, D. B., Langdon, R. W., Daniels, R. A., Kurtenbach, J. P., and Jacobson, R. A. (1999). Classification of freshwater fish species of the Northeastern United States for use in the development of indices of biological integrity, with regional applications. *Assessing the Sustainability and Biological Integrity of Water Resources Using Fish Communities*, T. P. Simon (ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 301-333.
- Hari, R. E., Livingstone, D. M., Siber, R., Burkhardt-Holm, P., and Güttinger, H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, **12**(1), pp. 10-26.

- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., Belt, K. T., Secor, D. H., and Wingate, R. L. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **8**(9), pp. 461-466.
- Mohseni, O., Stefan, H. G., and Eaton, J. G. (2003). Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climate Change*, **59**(3), pp. 389-409.
- Morrill, J. C., Bales, R. C., and Conklin, M. H. (2005). Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering*, **131**(1), pp. 139-146.
- Rahel, F. J., Keleher, C. J., and Anderson, J. L. (1996). Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: response to climate change. *Limnology and Oceanography*, **41**(5), pp. 1116-1123.
- Reeves, G. H., Bisson, P. A., and Dambacher, J. M. (1998). Fish communities. *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, R. J. Naiman, and R. E. Bilby (eds.), Springer, New York, New York, USA, pp. 200-234.
- Regier, H. A. and Meisner, J. D. (1990). Anticipated effects of climate change on freshwater fishes and their habitat. *Fisheries*, **15**(6), pp. 10-15.
- Simon, T. P. (1999). Introduction: biological integrity and use of ecological health concepts for application to water resource characterization. *Assessing the Sustainability and Biological Integrity of Water Resources Using Fish Communities*, T. P. Simon (ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 3-16.
- Stefan, H. G., Fang, X., and Eaton, J. G. (2001). Simulated fish habitat changes in North American lakes in response to projected climate warming. *Transactions of the American Fisheries Society*, **130**(3), pp. 459-477.
- Walling, D. E. and Webb, B. W. (1992). Water quality I. Physical characteristics. *The Rivers Handbook: Hydrological and Ecological Principles*, P. Calow, and G. E. Petts (eds.), **1**, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, pp. 48-72.
- Welch, E. B., Jacoby, J. M., and Lindell, T. (2004). *Fish. Pollutant Effects in Freshwater*, Third Edition, Spon Press, London, UK, pp. 353-399.
- Wood, C. M. and McDonald, G. (1997). *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish*, Society for Experimental Biology Seminar Series, 61, Cambridge University Press, Cambridge, UK.