

## 기후변화에 따른 낙동강 수계 어류 서식처 영향 분석

### Effect of Climate Change on Fish Habitat in the Nakdong River Watershed

강 형 식\* / 박 민 영\*\* / 장 재 호\*\*\*

Kang, Hyeongsik / Park, Min-Young / Jang, Jae-Ho

#### Abstract

In this study, the potential effects of increased water temperature on fish habitat were analysed in the streams of Nakdong River watershed. The changes in suitable habitats for each fish species and in species number at a habitat site were predicted, based on the maximum thermal tolerances of 22 fish species. The estimated maximum thermal tolerance ranged between 27.7°C and 33.1°C. Then, the increase of water temperature in 78-sites of Nakdong River watershed by 2100 was predicted by using the estimated air temperature data by 2100 in the literature and the regression analysis between air-temperature and water-temperature at each sites. The water temperature was estimated to have increased by 0.69°C, 1.76°C, and 2.32°C in 2011~2040 (period S1), 2041~2070 (S2), and 2071~2100 (S3), respectively. With such increases in water temperature, the averaged suitable habitats for all 22 fish species would be influenced by 21.9%, 36.3%, and 51.4% in periods S1, S2, and S3, respectively.

**Keywords** : water temperature increase, fish, habitat, maximum thermal tolerances, Nakdong river

#### 요 지

본 연구에서는 기후변화에 따른 수온상승이 낙동강 유역 어류 서식지에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 낙동강 유역에 서식하는 어종 중 22개 어종에 대한 최대내성한계온도를 산출하였으며, 이를 토대로 수온 상승에 따른 어류 서식지 및 서식지 지점별 어종 영향 정도를 분석하였다. 산정된 최대내성한계온도의 범위는 27.7~33.1°C의 범위를 나타냈다. 또한 기존에 예측된 기온 상승 데이터를 이용하여, 낙동강 78개 지점에서의 2100년도까지의 수온 상승을 예측하였으며, 수온 상승 예측을 위하여 낙동강 유역 78개 각 지점에서의 기온-수온의 회귀식을 산정하였다. 그 결과 S1 기간(2011~2040년)에 평균 0.69°C, S2기간(2041~2070년)에는 평균 1.76°C, S3기간(2071~2100년)에는 평균 2.32°C의 수온이 상승되는 것으로 나타났다. 이상의 수온상승에 따라 낙동강 22개 어종에 대해 S1-S3 각 기간별로 평균 21.9%, 36.3%, 51.4%의 서식처가 영향을 받는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 수온상승, 어류, 서식지, 최대내성한계온도, 낙동강

\* 교신저자, 한국환경정책·평가연구원, 물환경연구실, 부연구위원 (e-mail: hskang@kei.re.kr, Tel: 02-380-7601)

*Corresponding Author*, Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea.

\*\* 한국환경정책·평가연구원, 물환경연구실, 위촉연구원  
Researcher, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute

\*\*\* 한국환경정책·평가연구원, 물환경연구실, 초빙연구원  
Invited Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute

## 1. 서론

과거 물환경에 미치는 기후변화의 영향은 그 불확실성으로 인하여 국내·외 연구의 관심도가 높지 않았으나(김익재 등, 2009), 최근 이에 대한 중요성이 인식되어 기후변화가 수환경에 미치는 영향에 대해 파악하고 이에 대한 대비책을 마련하려는 노력들이 나타나고 있다. 이와 같은 노력의 일환으로 국내에서는 2007년부터 수생태계 건강성 조사가 매년 2회씩 이루어지고 있으며, 지난 10년 동안에는 국가장기생태연구 사업이 수행되어 오고 있다. 그러나 이러한 국내의 노력은 비교적 최근부터 시작된 것으로서, 아직까지는 기후변화에 따른 수생태 영향을 분석하기에는 그 축적된 데이터가 부족한 것이 사실이다. 하지만, 현시점에 있어 부족한 데이터이지만 기후변화가 수생태에 미치는 영향 정도 등을 파악하는 것이 필요하며, 이는 장기적인 관리계획 수립 및 관련 연구에 있어 필요할 것으로 예상된다.

기후변화가 미치는 영향 중 특히 수온의 증가는 하천 생태계에 영향을 끼치고 하천 생물군집에 변화를 가져올 수 있다. 최근 연구 결과들에 따르면 수온은 급격한 기후변화, 강수량의 변동, 산불 등 다양한 요인에 의해서 증가할 수 있지만(Isaak et al., 2010), 일반적으로 장기적인 수온 증가는 기온 상승과 상관성이 있다고 밝혀져 있다(Kaushal et al., 2010). 기온 상승으로 인해 하천의 온도가 높아지면 여름철 수온성층 강도의 강화 및 장기화를 유발하여 하천의 용존산소를 감소시키고, 결빙기간 감소와 조기 해빙으로 조류 번식이 증가하여 부영양화가 심해지며, 하천생물의 서식범위를 좁게 하여 생물 다양성을 감소시키는 등 담수환경에 여러 가지 영향을 미친다(Bates et al., 2008). 특히, 어류는 변온동물로서 생리적 측면 등에서 수온의 영향을 크게 받게 되고, 수온이 각 어류의 내성(tolerance) 온도 범위를 넘어가면 서식이 어려워진다. 기후변화로 인해 수온이 상승하여 어류가 견딜 수 있는 수온을 넘어서면 어류는 하천 내의 다른 적합한 장소를 찾아 이동하거나 절멸하는 것이 일반적인 특징이다(Eaton and Scheller, 1996). 특히 냉수성 어류와 같은 민감종의 경우 수온 증가에 따라 서식지가 북쪽으로 이동되거나 축소되고 있는데, 우리나라 열목어 서식 남방한계선에 위치한 낙동강 상류의 열목어(*Brachymystax lenok tsinlingensis*)는 수온상승 현상이 발생하면 생육에 적절한 온도를 위하여 지속적으로 상류로 이동하게 되겠지만 단절된 수계로 인하여 결과적으로 절멸하게 될 가능성이 높다(Joo et al., 2008).

이러한 기후변화에 따른 어류 서식처 영향을 분석하기 위하여 어류의 서식처 적합성을 파악하려는 연구들이 진행되어왔다. 어류와 수온 자료의 시공간적 분석을 통한 어류 서식처 온도 산정 연구는 Biesinger et al. (1979)부터 시작되었다고 할 수 있는데, 이 연구에서 처음으로 FTDMS (Fish and Temperature Database Matching System)를 개발하여 미국 전역의 다양한 형태의 어류상 데이터와 수온 데이터를 수집하고 분석하는 기법을 제시하였다. 그 후 Eaton et al. (1995)은 이 데이터베이스에 새로운 데이터를 추가하고 더욱 발전된 컴퓨터 프로그램을 활용하여 약 30종의 어류 최대내성한계온도를 산정하여 제시하였다. 이후 Eaton and Scheller (1996), Mohseni et al. (2003)은 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따른 기후변화 모델링 결과를 통하여 수온상승을 예측하고 이를 지리정보시스템을 이용한 수온-어류 데이터와 연계하여 수온증가가 어류의 서식처에 미치는 영향을 평가하였다. 국내에서도 기후변화와 담수 어류 서식처 영향에 대한 정성적인 방법으로는 예측은 이루어지고 있으나, 실제 국내 데이터 분석을 통한 정량적인 연구결과는 Chung et al. (2011) 외에 전무한 실정이다. Chung et al. (2011)에서는 한강 수계를 대상으로 하여 어류군집 및 수온자료를 결합하여 어종별 최대내성한계온도를 산정하고 1~3℃ 수온증가에 따른 서식지 변화와 어종 변화율을 분석하였다.

본 연구에서는 낙동강 유역을 대상으로 수온 증가가 어류 서식처에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 기후변화 시나리오에 따른 낙동강 수계의 수온증가를 예측하고 어류의 최대내성한계온도와 비교하여 기후변화에 따른 어류별 적합서식지 변화율과 서식 지점별 어종의 감소율 등을 분석하였다.

## 2. 기후변화에 따른 수온변화 예측

### 2.1 대상지점 선정

본 연구에서는 낙동강 유역 하천을 대상으로 기후변화에 따른 수온 상승과 이로 인한 어류 서식처 영향 정도를 분석하였다. 우선, 낙동강 유역에서 측정된 수온과 어류 데이터 분석을 위해, 두 자료의 측정 위치가 서로 동일한 지점을 선정하여 이들 지점을 중심으로 수온변화에 따른 어류 서식처 영향을 분석하였다. 이를 위해 환경부 수생태계 건강성 조사 자료(National Institute of Environment Research, 2007; Ministry of Environment, 2008; 2010a)에서의 측정지점과 전국 수질측정망의 하천 수온 자료(Ministry of Environment, 2009; 2010b)의 측정지점 위치

를 비교하였다. 두 데이터 간의 위치정보 비교를 위해 지리정보시스템(GIS) 상에서 하천명, 행정구역명, 교량 명 등의 세부 조사위치가 동일한 지점을 같은 쌍으로 연결하였다. Fig. 1은 수생태계 건강성 조사지점인 150개 지점과 수질 측정망 지점인 198개 지점을 비교하여 지점이 서로 일치하는 78개 지점을 선정된 결과를 보여준다. 이와 같이 선정된 78개 지점을 대상으로 먼저 장래 수온 변화를 예측하고, 각 지점별 어류 데이터를 활용하여 수온 상승에 따른 서식처 영향을 분석하였다.

## 2.2 장래 수온변화 예측

Ahn et al. (2010)과 Shon et al. (2010)의 연구에서는 낙동강 유역에서 기후변화에 따른 물환경 변화에 대해 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는 이들 연구 결과중 하나인 미래 낙동강 유역에서의 기온변화 결과를 이용하여 수온 변화를 예측하였다. 먼저, Ahn et al. (2010)과 Shon et al. (2010)의 연구에서는 미래 기온변화에 따른 수온상승을 예측하기 위하여 총 17개의 전지구기후모형(GCM: Global Climate Model) 자료를 수집하여 기후 시나리오인 20C3M 시나리오의 모의결과와 우리나라 24개 기상관측 지점의 1971~2000년 기온 및 강수량자료를 비교·검증하였다. 최종적으로 GCMs의 동아시아의 육지표현능력이 뚜렷하며

현재기후의 재현성과 우리나라 수환경과의 적합성 및 영향 분석에 필요한 자료의 이용성 등을 고려하여 비교적 한반도의 기후 특성을 잘 재현하고 있는 캐나다(CCCma: CGCM3-T63, 즉 CT63) 모형의 A1B 시나리오(2011~2100년)를 선정하였다(Table 1). 또한, 편의보정과정을 거쳐 획득한 현재 및 미래 강수량과 평균기온 자료를 이용하여 시공간적 변화인자 기법(Spatio-Temporal Changing Factor Method, STCFM)을 적용하여 상세화하였다. STCFM은 현재 기후의 공간 패턴이 미래에는 변화가 없다고 가정하여 특정년도를 기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 기후변화영향평가를 위한 국내·외 연구에 널리 적용되어 왔다(Park et al., 2009; Lee and Kim, 2011; Choi et al. 2009; Stonefett et al., 2000; Varanou et al., 2002). 이 기법은 현재 기후에 의한 통계학적 상관성이 미래 기후에도 영향을 미칠 수 있다는 단점이 있지만, 월 강수량 및 월 평균기온에 근거하여 비교적 간단하며 계산이 경제적이기 때문에 GCM 자료를 이용하여 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다(Ahn et al., 2010; Wilby and Dawson, 2007).

이상의 연구결과를 토대로, 낙동강 유역 19개 기상관측 지점에 대하여 2011년부터 2100년까지의 일별 기온자료를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2는 01지점에서의 현재부터 2100년도까지의 기온과 수온변화를 동시에 나타낸 것

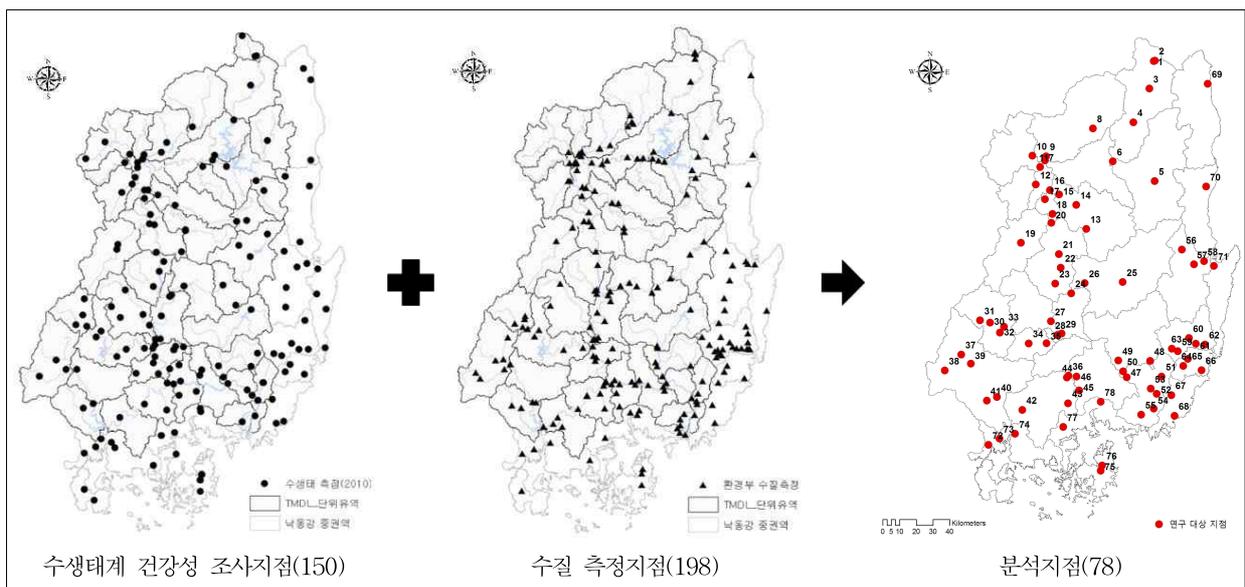


Fig. 1. Location of 78 Sampling Sites Used to Study Fish Habitat and Water Temperature

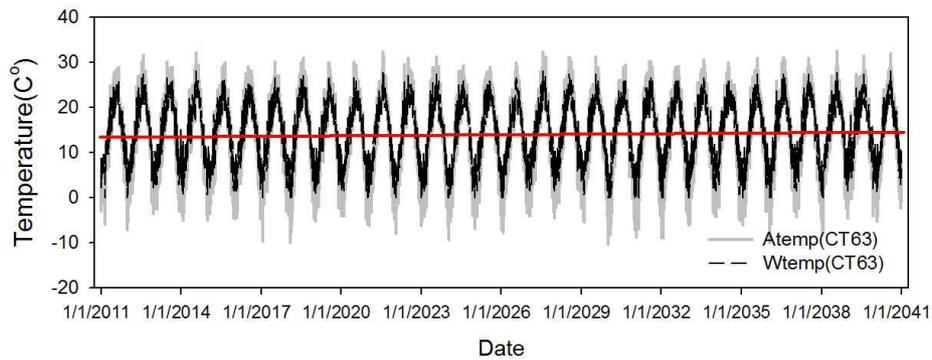
Table 1. GCMs (PCMDI, 2009)

Model and production year	GCM	Atmospheric	The ocean	Country
CGCM3.1(T63), 2005	CGHR (T63)	1.9°×1.9°	0.9°×1.4°	Canada

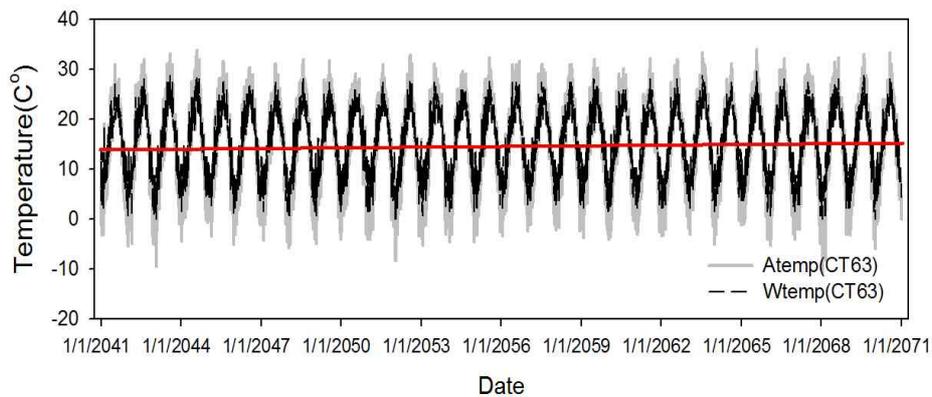
이다. 여기서 01지점의 위치는 Fig. 1을 참고할 수 있다. 한편, Fig. 2에서 미래 수온변화를 예측하기 위해 낙동강 유역 78개 대상지점에서 2004~2009년 간 8일 측정 수온자료와 기온 데이터 사이의 회귀식을 작성하여 산정하였다. 78개 지점에 대한 기온자료는 Fig. 3과 같이 낙동강 유역에 대한 기상관측소의 티센망을 작성하여 이용하였다. Fig. 4는 01과 37지점에서 산정된 수온과 기온의 산포도와 회귀식을 보여주며, Table 2는 78개 각 지점별 회귀식인 수온 = a×기온+b에서 a와 b의 값과 계산된 R<sup>2</sup>를 나타낸다. 이상

의 회귀식을 이용하여 각 지점별 2011년부터 2100년까지의 일별 수온변화를 예측하였다. 계산된 R<sup>2</sup>의 값은 0.86~0.96의 범위에서 산정되어 본 연구에서 산정된 회귀식이 수온과 기온 데이터를 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

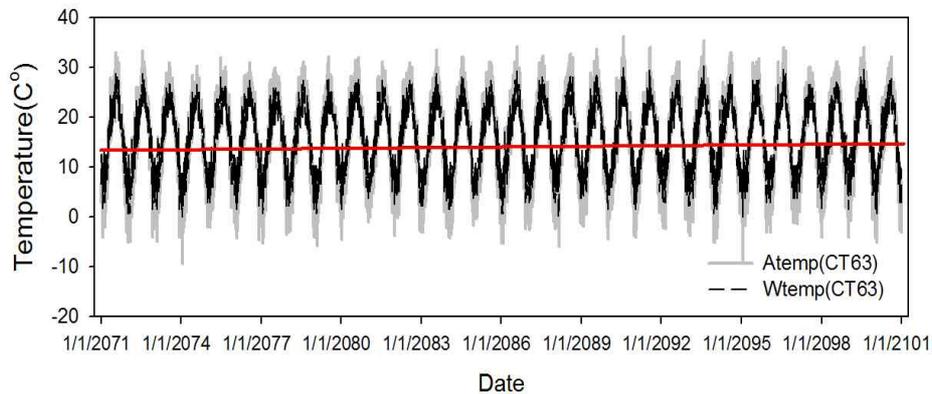
Fig. 5는 연도별 78개 지점에서의 수온 평균값의 변화를 보여준다. 전반적으로 기후변화에 의해 수온이 상승되는 것을 확인할 수 있다. 또한 단계적 변화를 확인하기 위하여 총 90년의 기간을 3개의 기간으로 구분하여(S1: 2011~2040년, S2: 2041~2070년, S3: 2071~2100년) 각 지점별



(a) 기온 및 수온 예측결과(S1)



(b) 기온 및 수온 예측결과(S2)



(c) 기온 및 수온 예측결과(S3)

Fig. 2. Estimated Air and Water Temperatures at Site 01

Table 2. Regression Equation between Air Temperature and Water Temperature at Each Point

지점번호	a	b	R <sup>2</sup>	지점번호	a	b	R <sup>2</sup>
01	0.7405	4.418	0.93	40	0.8777	3.9851	0.95
02	0.7405	4.418	0.93	41	0.8777	3.9851	0.95
03	0.8793	4.0801	0.92	42	0.8777	3.9851	0.95
04	0.8793	4.0801	0.92	43	0.9712	2.3948	0.91
05	0.8133	5.1682	0.93	44	0.9712	2.3948	0.91
06	0.7871	4.9664	0.92	45	0.8703	4.1478	0.92
07	0.9175	2.2535	0.96	46	0.8703	4.1478	0.92
08	0.8334	2.2535	0.90	47	0.8928	3.697	0.92
09	0.9286	3.809	0.94	48	0.8672	4.3449	0.93
10	0.884	4.9495	0.92	49	0.8672	4.3449	0.93
11	0.884	4.9495	0.92	50	0.8672	4.3449	0.93
12	0.8687	5.8659	0.94	51	0.9406	2.5188	0.86
13	0.8836	5.4977	0.93	52	0.9406	2.5188	0.86
14	0.891	4.1788	0.95	53	0.8773	3.9679	0.90
15	0.891	4.1788	0.95	54	0.9931	1.2302	0.89
16	0.891	4.1788	0.95	55	0.9931	1.2302	0.89
17	0.9175	2.2535	0.96	56	0.8957	4.4485	0.93
18	0.8807	3.9459	0.94	57	0.8957	4.4485	0.93
19	0.8743	5.1375	0.87	58	0.8957	4.4485	0.93
20	0.8743	5.1375	0.87	59	0.8672	4.3449	0.93
21	0.8807	3.9459	0.94	60	0.8672	4.3449	0.93
22	0.8684	4.0796	0.91	61	0.8672	4.3449	0.93
23	0.8684	4.0796	0.91	62	0.8672	4.3449	0.93
24	0.8804	3.5866	0.93	63	0.8672	4.3449	0.93
25	0.9354	1.552	0.95	64	0.9406	2.5188	0.86
26	0.847	4.0833	0.95	65	0.9406	2.5188	0.86
27	0.9366	3.5983	0.89	66	0.9406	2.5188	0.86
28	0.9366	3.5983	0.89	67	0.9931	1.2302	0.89
29	0.8804	3.5866	0.93	68	0.9931	1.2302	0.89
30	0.8043	4.5023	0.91	69	0.8776	6.2221	0.90
31	0.8043	4.5023	0.91	70	0.8133	5.1682	0.93
32	0.8043	4.5023	0.91	71	0.8873	3.8168	0.93
33	0.8043	4.5023	0.91	72	0.8777	3.9851	0.95
34	0.8043	4.5023	0.91	73	0.8777	3.9851	0.95
35	0.8043	4.5023	0.91	74	0.8777	3.9851	0.95
36	0.8833	3.4288	0.94	75	0.8703	4.1478	0.92
37	0.8777	3.9851	0.95	76	0.8703	4.1478	0.92
38	0.8777	3.9851	0.95	77	0.9712	2.3948	0.91
39	0.8777	3.9851	0.95	78	0.8672	4.3449	0.92

water tmp.=a × (air tmp.) + b

로 수온 평균값을 계산하였으며, 과거 30년(S0: 1980~2009년) 수온평균과 비교하였다. Table 3은 S0-S3기간 동안의 수온과 기온 평균값의 변화를 보여준다. 과거 30년 평균 수온인 15.53°C에 대해 2011~2040년도 평균은 약 16.22°C, 2041~2070년도의 평균은 약 17.28°C, 2071~2100년도 평균은 약 17.84°C로서 각각 0.69°C, 1.75°C, 2.31°C 상승하는 것으로 예측되었다. Fig. 6은 S3기간과 S0기

간의 수온 평균값의 차이에 대한 공간 분포도를 보여준다. 그림에서 색이 짙어 질수록 수온 차이가 더 크게 나타나는 지점을 의미하며, 이러한 지점에서는 향후 수온상승에 따른 수생물 서식처에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그림을 살펴보면 낙동강 분류를 중심으로 상류 보다는 하류 구간에서 수온 상승 폭이 더 크게 나타났으며, 특히 부산 및 남해 부근에서 수온 상승이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 낙동강 분류 구간이 지류 보다 수온 상승 폭이 다소 클 것으로 예측되었다.

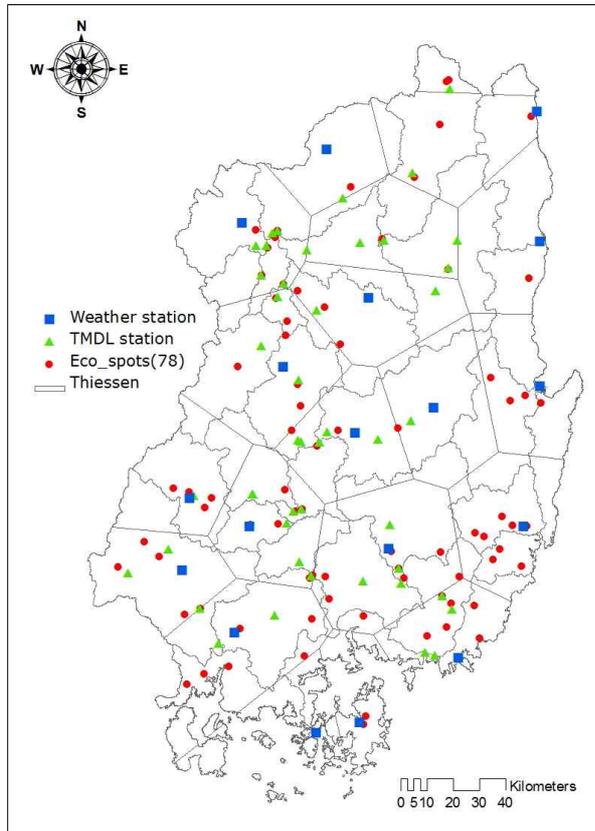
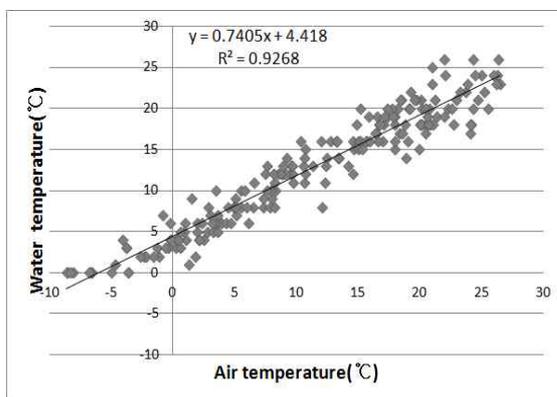


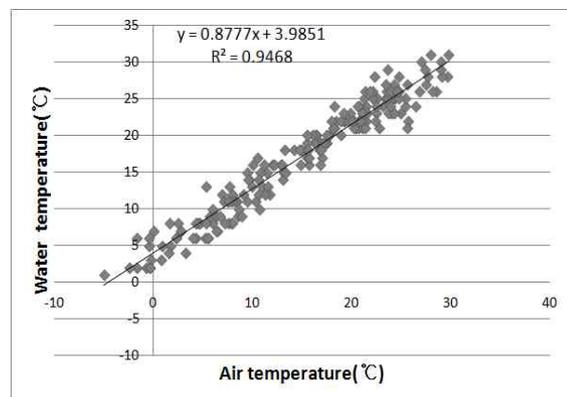
Fig. 3. Thiessen of Weather Station

### 3. 어류 최대내성한계온도

어류군집과 수온 데이터를 연계하기 위하여 2007년부터 2010년 사이의 환경부 수생태계 건강성 조사의 어류상 자료(Ministry of Environment, 2008; 2010a)와 전국 수질 측정망의 하천 수온측정 자료(Ministry of Environment, 2009; 2010)를 수집하였다. 수생태계 건강성 조사의 어류 데이터는 2007년부터 2010년까지 4년 동안의 자료를 사용하였는데 2007년 1회, 그 이후 매 년 2회씩 실시되어 총 7회분의 어류 조사 자료를 수집하였다. 어류는 1회 조사시 출현한 개체수가 1개체밖에 없거나, 발견 지점이 2지점 이하로 제한적인 종들은 분석에서 제외하였다. 또한 정수성 및 기수성, 회유성, 외래종 어류는 제외하여, 최종적으로 어류 22종이 선정되었다. 이상과 같이 지난 4년간(2007~2010년) 수집된 어류 데이터와 이때의 수온 데이터를 이용하여 동일년도에 특정 지점에서 발견된 어류와 그 지점의 수온자료를 한 쌍으로 연결하여 각 어종 별로 지난 4년간 출현한 모든 지점의 수온데이터를 추출하였다. Fig. 7은 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*)와 치리(*Hemiculter eigenmanni*)에 대한 서식온도를 정리한 예를 보여준다. 이상의 자료수집 및 분



(a) 지점 01



(b) 지점 37

Fig. 4. Regression Result and Dispersion at Sites 01 and 37

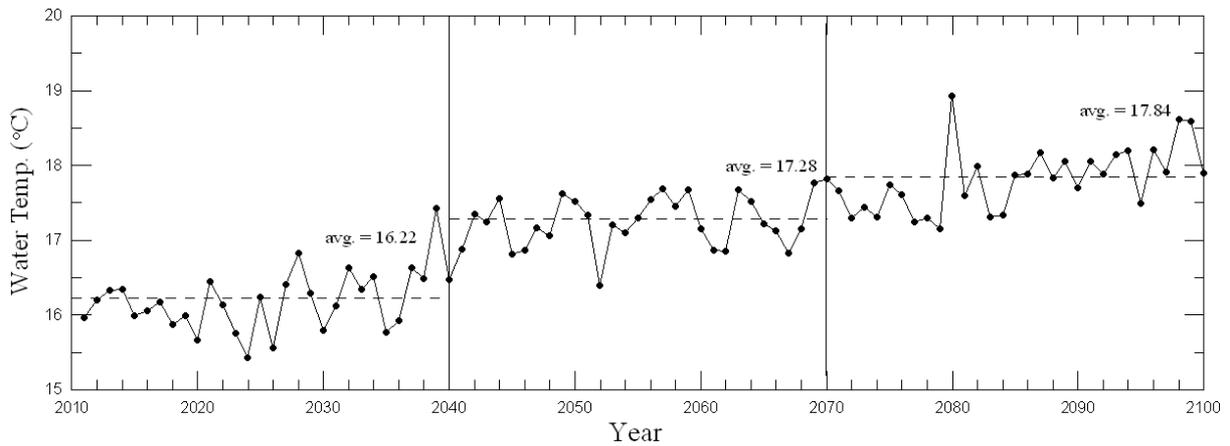


Fig. 5. Changes of Annual Averaged Water Temperature

Table 3. Averaged Air Temperature and Water Temperature

기간	기온(°C)	수온(°C)
S0 (1980~2009)	13.17	15.53
S1 (2011~2040)	13.94	16.22 ( $\Delta 0.69$ )
S2 (2041~2070)	15.17	17.28 ( $\Delta 1.75$ )
S3 (2071~2100)	15.80	17.84 ( $\Delta 2.31$ )

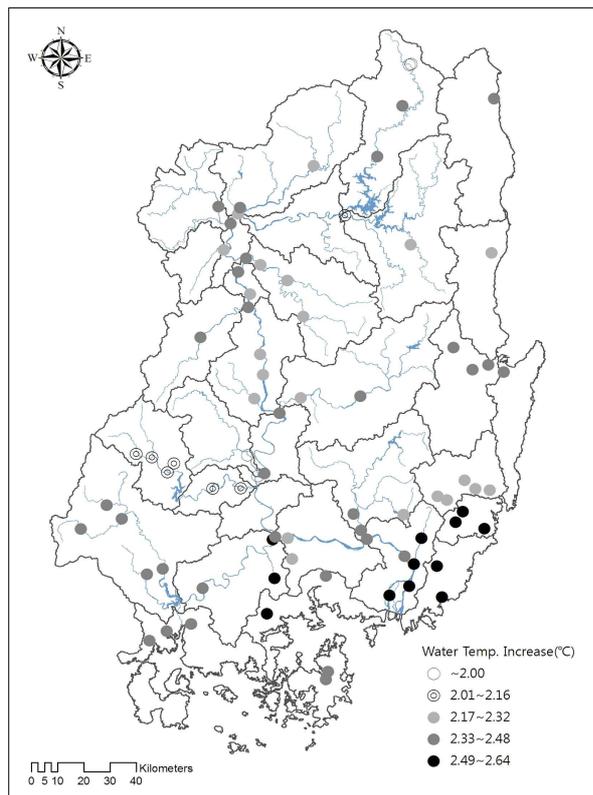


Fig. 6. Increase of Water Temperature (S0~S3)

석방법은 Eaton et al. (1995), Eaton and Scheller (1996) 및 Chung et al. (2011)을 참고하였다.

각 어종 별로 구축된 수온 자료 데이터베이스를 이용하여 종별 최대내성한계온도(maximum thermal tolerance)를 추정하였다. 어류별 전체 서식온도의 99분위수(99th percentile)에 해당하는 온도를 최대내성한계온도로 산정하였다. 이는 자료에 유효하지 않은 수온 값이 포함되어있을 가능성을 고려하였기 때문인데, Eaton et al. (1995)의 연구를 보면 최고 온도 대신 95분위수를 사용하였으며, Chung et al. (2011)에서는 99분위수에 해당하는 수온 값을 각 어류의 최대내성한계온도로 산정하였다. 본 연구에서도 자료의 양이 비교적 방대하지 않은 점을 감안하여 최고 수온 대신 99분위수를 사용하였다. 앞에서 산정된 22개 어종에 대한 분석 결과 대상 어류의 최대내성한계온도는 27.7~33.1°C의 범위였으며, 한강수계 어류의 최대내성한계온도 추정값(25~31°C)보다 다소 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다(Table 4). 특히, 상류 지역에 서식하는 왕종개, 버들치, 자가사리의 최대내성한계온도가 27.7°C, 28.4°C, 29.7°C로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 중하류 지역에 서식하는 각시붕어가 33.1°C로 가장 높은 최대내성한계온도를 갖으며, 다음으로는 큰납지리, 미꾸리, 모래무지, 피라미가 31°C로 비교적 높은 내성온도를 갖는 것으로 분석되었다.

#### 4. 기후변화에 따른 어류 서식처 영향 분석

기후변화에 따른 수온 상승이 어류 서식처에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 어종별 산정된 최대내성한계온도와 S1~S3기간 동안 예측된 일별 수온 데이터를 이용하여 어종 별 서식처 영향 범위를 산정하였다. 즉, 78개 지점에서 산정된 현재 수온 대비 향후 기후변화에 의한 수온상승 폭

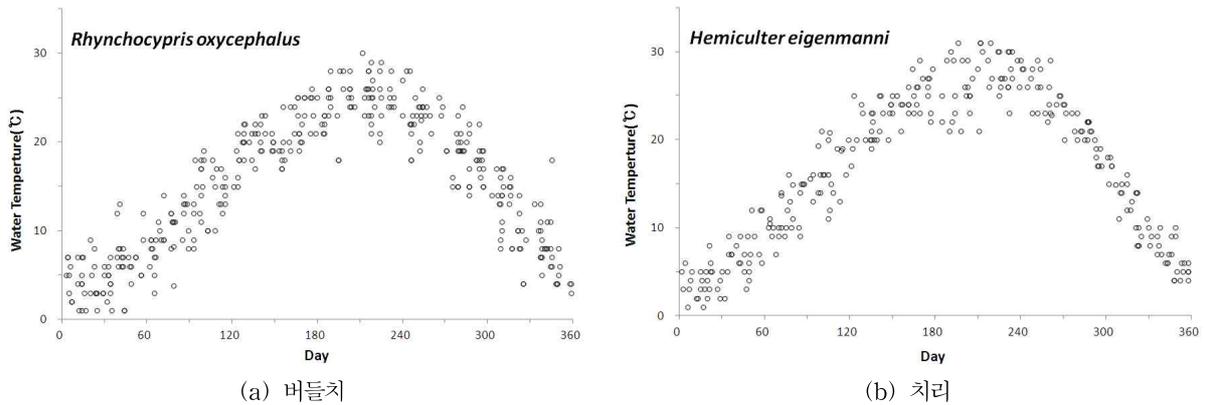


Fig. 7. Fish-water Temperature Dataset during 2007~2010

Table 4. Estimated Maximum Thermal Tolerance and Percent Changes in Suitable Habitat

서식 위치	어류	학명	최대 내성온도	적합 서식처수	서식처 감소율(%)		
					S1	S2	S3
상류	버들치	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	28.4	7	28.6	42.9	42.9
	자카사리	<i>Liobagrus mediadiposalis</i>	29.7	6	16.7	16.7	33.3
	수수미꾸리	<i>Niwaella multifasciata</i>	30.0	7	42.9	42.9	57.1
	평균		29.4	6.7	29.4	34.1	44.4
상/중류	왕중개	<i>Iksookimia longicorpa</i>	27.7	3	66.7	66.7	66.7
	쉬리	<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	30.0	9	22.2	33.3	33.3
	기름중개	<i>Cobitis hankugensis</i>	30.0	9	22.2	33.3	55.6
	참갈겨니	<i>Zacco koreanus</i>	30.0	24	16.7	29.2	50.0
	동사리	<i>Odontobutis platycephala</i>	30.0	24	29.2	41.7	62.5
	흰수마자	<i>Gobiobotia nakdongensis</i>	31.0	4	0.0	25.0	75.0
평균		29.8	12.2	26.2	38.2	57.2	
중류	점몰개	<i>Squalidus multimaculatus</i>	29.0	4	25.0	50.0	50.0
	참마자	<i>Hamibarbus longirostris</i>	30.0	4	50.0	50.0	50.0
	돌마자	<i>Microphysogobio yaluensis</i>	30.0	6	16.7	33.3	50.0
	검정망둑	<i>Tridentiger obscurus</i>	30.0	11	36.4	45.5	72.7
	돌고기	<i>Pungtungia herzi</i>	30.0	17	17.6	29.4	41.2
	꺼지	<i>Coreoperca herzi</i>	30.5	14	14.3	35.7	35.7
	긴몰개	<i>Squalidus gracilismajimae</i>	30.5	17	8.3	50.0	58.3
	각시붕어	<i>Rhodeus uyekii</i>	33.1	3	0.0	33.3	33.3
	평균		30.4	9.5	21.0	40.9	48.9
중/하류	치리	<i>Hemiculter eigenmanni</i>	30.0	7	28.6	42.9	57.1
	민물검정망둑	<i>Tridentiger brevispinis</i>	30.0	15	26.7	46.7	86.7
	큰납지리	<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	31.0	7	14.3	42.9	57.1
	미꾸리	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	31.0	12	0.0	0.0	33.3
	모래무지	<i>Pseudogobio esocinus</i>	31.0	32	9.4	18.8	37.5
	피라미	<i>Zacco platypus</i>	31.0	50	12.0	26.0	42.0
	평균		30.7	20.5	15.1	29.5	52.3
전체평균			30.2	12.7	21.9	36.3	51.4

과 각 어종별로 산정된 최대내성한계온도를 비교하여, 각 지점별 미래 수온 값이 최대내성한계온도를 초과하는 경우의 어류는 해당 지점에서 서식이 적합하지 않다고 판단하여 대체 서식지로 이동하거나 사멸할 것으로 가정하였다.

Table 4는 22개 대상 어종 별 최대내성한계온도와 S1-S3기간에 대한 적합 서식처 감소율을 보여준다. Table 4에서 상류, 상/중류, 중류 및 중/하류 유역에 서식하는 종에 대한 분류는 National Institute of Environment Research (2009)의 내용을 따라 정리하였다. Table 4를 살펴보면, 총 22종의 어류를 대상으로 S1기간에 평균 21.9%, S2기간에 평균 36.3%, S3기간에 51.4%의 적합 서식처가 감소하는 것으로 분석되었다. 서식 위치에 따라서는 상류에 서식하는 어류는 같은 기간별로 서식처가 각각 29.41%, 34.1%, 44.4% 감소하는 것으로 분석되었고, 상/중류에 서식하는 어류는 26.2%, 38.2%, 57.2%, 중류에 서식하는 어류는 21.0%, 40.9%, 48.9%, 중/하류에 서식하는 어류는 각각 15.1%, 29.5%, 52.3%의 서식처가 감소하는 것으로 나타났다. 서식 위치별로 살펴보면 S1기간에 중/하류보다 상류로 갈수록 적합서식처 감소율이 큰 것으로 나타났는데, 이는 수온이 낮고 용존산소가 풍부한 상류 유역에 서식하는 종들이 수온 상승에 상대적으로 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다 (Chung et al., 2011). 그러나 S2와 S3기간에는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 어류별로 살펴보면 왕종개, 참마자, 수수미꾸리 등의 어류가 단기간의 수온변화에도 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 민물검정망둑, 흰수마자, 검정망둑 등의 어류는 S3기간 사이에 현재 서식처의 70% 이상이 부적합 서식처로 바뀌는 것으로 나타났다.

Table 5는 각 기간별 수온 상승의 영향으로 각 조사 지점에서 부적합 서식지 비율을 정리한 것을 나타낸다. 즉, Table 5에서 S1기간 동안 수온 상승의 영향으로 인해 특정 조사기간 동안 발견된 22개 어종 중 81% 이상의 종이 대체 서식지로 이동하거나 사멸할 가능성이 있는 서식지가 전체

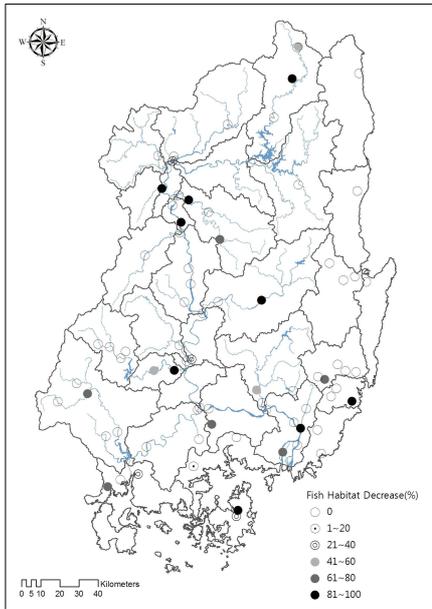
78개 중 약 11.5%인 9개인 것을 의미한다. 따라서 S1-S3기간 동안 수온 상승에 의해 전체 78개 서식지 중 서식지 영향이 전혀 없는 지점은 각각 70.5%, 57.7%, 39.7%인 것으로 나타났으며, 반대로 각각 23개, 33개, 47개 지점은 수온 상승에 의해 서식지가 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 78개 각 지점별로 80% 이상의 종의 서식지가 영향을 받는 비율은 각각 11.5%, 25.6%, 39.7%인 것으로 분석되었다. Fig. 8은 앞의 Table 5에 대한 정보를 지도상의 각 지점에 표시한 것을 나타낸다. Fig. 8을 살펴보면, S1기간 동안 각 지점별로 80% 이상의 어류가 영향을 받는 지점은 낙동강 분류를 기준으로 상류 지역에 다소 더 많이 분포하는 것으로 나타났다. 또한 S2 구간에서는 60% 이상의 어류가 영향을 받는 지역이 낙동강 분류 보다는 각 지류 구간에서 더 많이 분포하는 것을 볼 수 있다.

이상의 연구 결과에서는 기후변화에 따른 수온 상승폭과 이로 인한 어류 서식처의 영향분포를 보여주었다. 그러나 이와 같은 연구는 현재 가용할 수 있는 데이터가 고작 최근 4년 동안 한정된 지점에서의 모니터링 자료가 전부이기 때문에, 연구 결과의 신뢰도 향상을 위해서는 향후 더 많은 데이터 확보를 통한 연구 결과의 보완이 필요할 것으로 보인다. 그러나 국내에서 기후변화에 따른 수생태 영향 및 이에 대한 장기적 관리 방안 등이 최근에 이루어지는 점을 고려해 볼 때 본 연구결과가 관련 연구 및 정책 입안자에게 있어 그 기여도가 클 것으로 판단된다.

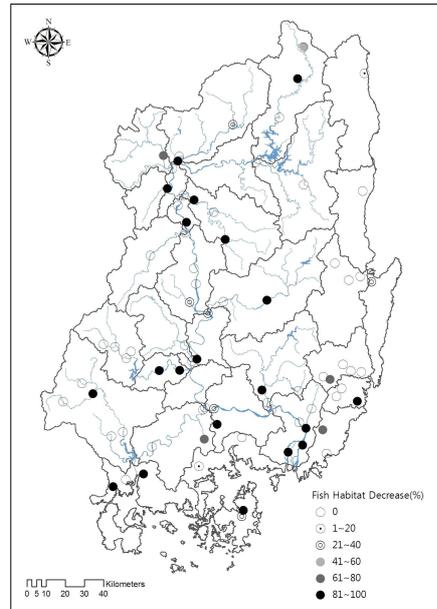
한편, 이상과 같은 기후변화에 따른 수온상승이 수생물에 미치는 영향을 감소시키기 위한 관리 방안이 필요할 것으로 판단된다. 이와 관련해서 Isaak et al. (2010)에 따르면 1993~2006년 동안 아이다호의 하천 2,500 km를 조사한 결과 수온이 평균 0.38°C 상승하였는데, 특히 산불이 일어난 지역은 평균보다 2~3배 많이 수온이 증가한 것으로 조사되었다. 이는 산불로 인해 수림대가 손실되어 일사량이 증가하였기 때문이며, 하천 수온 조절에 수림대가 중요한 역

Table 5. Relative Proportion of Unsuitable Habitat with the Decrease Rate of the Number of Fish Species (%)

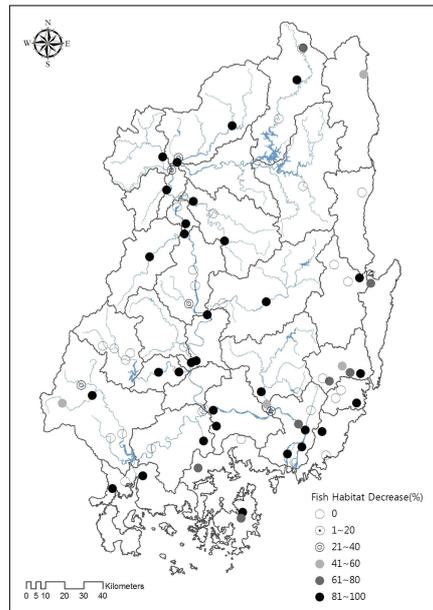
어류종수감소율 \ 수온변화	S1	S2	S3
None	70.5	57.7	39.7
0~20%	1.3	2.6	0.0
21~40%	5.1	7.7	6.4
41~60%	3.8	1.3	5.1
61~80%	7.7	5.1	9.0
81~100%	11.5	25.6	39.7



(a) S1 (2011~2040)



(b) S2 (2041~2070)



(c) S3 (2071~2100)

Fig. 8. Decrease of the Number of Fish Species

할을 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 수온에 따른 서식처 감소 영향이 크게 조사된 지점은 우선적으로 수립대 조성·관리 등을 통하여 이를 대비해야 할 것으로 판단된다. 또한 수온 상승의 영향으로 어류가 적합 서식처를 찾아 상류로 이동할 때, 하천을 단절하고 있는 구조물로 인해 개체가 절멸하지 않도록, 주요 서식지점의 하천 내 단절요소를 관리하고 어도를 설치하는 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수온 증가가 어류 서식처에 미치는 영향 정도를 파악하였다. 이를 위하여 낙동강 유역에 대해 기존의 기후변화 모델을 통해 기온을 예측하고, 기온과 수온의 회귀식을 작성하여 2100년까지의 일별 수온 변화를 산정하였다. 또한 낙동강 유역에 서식

하는 22종 어류를 대상으로 최대내성한계온도를 산정하고, 예측된 미래 수온증가와 비교하여 어류별 적합서식지 변화율과 서식 지점별 어종의 감소율을 분석하였다. 이상의 본 연구를 통한 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) CT63 모형의 AIB 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 기온상승과 이에 따른 수온변화를 예측한 결과 78개 대상지점에 대한 평균 수온이 S1기간에 0.69°C, S2기간에 1.76°C, S3기간에 2.32°C 수온이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 낙동강 수계 담수어류의 최대내성한계온도를 산정한 결과 22종의 최대 내성 온도는 27.7~33.1°C의 범위를 나타내었다. 왕종개(*Iksookimia longicorpa*)의 최대내성한계온도가 가장 낮았으며, 각시붕어(*Rhodeus uyekii*)의 최대내성한계온도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 대상 어종을 서식위치에 따라 상류, 상중류, 중류, 중하류로 구분하였을 때 S1기간 동안 상류에서 하류로 갈수록 종별 최대내성한계온도가 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 대상어류 22종에 대해 S1기간에 평균 21.9%, S2기간에 평균 36.3%, S3기간에 평균 51.4%의 적합 서식처가 감소하는 것으로 분석되었다. 각 서식처별로 서식 적합성에 영향을 받는 어류 종수의 비율을 분석한 결과, 영향을 받지 않을 것으로 예측되는 서식지의 비율은 기간별로 70.5%(S1), 57.7%(S2), 39.7%(S3)로 감소하였고, 80% 이상 영향을 받을 것으로 예측되는 서식지의 비율은 기간별로 11.5%(S1), 25.6%(S2), 39.7%(S3)로 증가하였다.
- 4) 본 연구결과를 한강수계의 어류 서식온도 결과와 비교해 보면 약 11종의 동일 어류의 최대내성한계온도가 낙동강수계에서 약 1°C 정도 높게 나타났음이 발견되었다. 이는 대상 수계의 위도에 따른 평균 온도 차이로 인해 각 수계의 어류가 동일하지 않은 내성 온도를 가지고 있다고 판단할 수 있으나, 분석을 위한 자료의 공간분포와 양이 충분하지 못하여 발생할 수 있는 오차의 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 향후 전국 수계를 대상으로 많은 양의 자료를 확보하여 분석하면 우리나라 전역을 모두 포함하는 광범위하고 보다 정확한 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구방법에서 수온변화 이외의 기상이나 외부 물리적 영향 등 다른 조건들이 동일하다고 가정한 점은 연구의 한계로 볼 수 있다. 어류의 서식온도에 관한 분석은 생물학적 실험을 통한 연구에서 더욱 정확한 결과가 도출될 수 있겠지만,

본 연구는 광범위한 어류종에 대해 분석 가능한 경제적이고 효과적인 기법(Eaton et al., 1995)이라는 점에서 의의를 가질 수 있을 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 논문은 한국환경정책·평가연구원에서 수행한 “기후변화를 고려한 지류하천 관리 및 수생태 복원 방향” 연구의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Ahn, J.H., Hong, Y.S., Kang, H., Kim, H.J., Han, D.H., Jang, J.H., Seo, D.I., and Park, Y.H. (2010). Water quality management strategy in the context of climate change I. Green Growth Research Report, 11-02-85(5), Korea Environment Institute (in Korean).
- Bates, B.C., Kundzewicz, S.W., Wu, S., and Palutikof, J.P. (2008). *Climate change and water*. Technical paper of the IPCC Secretariat, Geneva, Swiss.
- Biesinger, K.E., Brown, R.P., Bernick, C.R., Flithner, G.A., and Hokanson, K.E.F. (1979). A national compendium of freshwater fish and water temperature data. Volume 1. Data management techniques, output examples and limitations. EPA, Report 600/3-79-056, Duluth, MN.
- Choi, D., Keem, M.S., Kim, N.W., and Kim, S. (2009). “An Analysis of the effect of climate change on Byeongseong stream’s hydrologic and water quality responses using CGCM’s future climate information.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 11, pp. 921-931(in Korean).
- Chung, N., Park, B., and Kim, K. (2011). “Potential effect of increased water temperature on fish habitats in Han river watershed.” *Journal of Korean Society of Water Environment*, Vol. 27, No. 3, pp. 314-321 (in Korean).
- 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*, Vol. 41, No. 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*, Vol. 20, No. 4, pp. 10-18.
- Isaak, D.J., Luce, C.H., Rieman, B.E., Nagel, D.E., Peterson, E.E., Horan, D.L., Parkes, S., and Chandler, G.L. (2010). "Effects of climate change and wildfire on stream temperatures and salmonid thermal habitat in a mountain river network." *Ecological Applications*, Vol. 20, No. 5, pp. 1350-1371.
- Joo, G.-J., Kim, D.-K., Yoon, J.-D., and Jeong, K.-S. (2008). "Climate changes and freshwater ecosystems in South Korea." *Journal of Korean Society Environment Engineers*, KSEE, Vol. 30, No. 12, pp. 1190-1196 (in Korean).
- 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*, Vol. 8, No. 9, pp. 461-466.
- Kim, I.J., Ahn, J.H., and Han, D.H. (2009). Water environment management strategy I: Response to climate change. Research Report 2009-13, Korea environment Institute(in Korean).
- Lee, A.Y., and Kim, S.D. (2011). "An Analysis of the Effect of Climate Change on Nakdong River Environmental Flow." *Journal of Korean Society of Water Environment*, Vol. 27, No. 3, pp. 273-285 (in Korean).
- Ministry of Environment (2008). Aquatic ecosystem health investigation and assessment: Nakdong river watershed (in Korean).
- Ministry of Environment (2010a). Aquatic ecosystem health investigation and assessment: Nakdong river watershed (in Korean).
- Ministry of Environment (2009). Water environment information system. <http://water.nier.go.kr/>.
- Ministry of Environment (2010b). Water quality monitoring network plan(in Korean).
- Mohseni, O., Stefan, H.G., and Eaton, J.G. (2003). Global Warming and Potential Changes in Fish Habitat in U.S. Streams. *Climate Change*, Vol. 59, No. 3, pp. 389-409.
- National Institute of Environment Research (2007). Assessment of Aquatic Ecosystem's health and selection of investigation sections for assessment system construction. Final Report (in Korean).
- National Institute of Environment Research (2009). Fish photograph collection of our rivers (I). Ministry of Environment (in Korean).
- National Institute of Environment Research (2012). Water quality monitoring data in Nakdong watershed rivers (internal data).
- Park, J.Y., Park, M.J., Ahn, S.R., and Kim, S.J. (2009). "Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889 (in Korean).
- PCMDI (2009). <http://www-pcmdi.llnl.gov/>.
- Shon, T.S., Lee, S.D., Kim, S.D., and Shin, H.S. (2010). "An Analysis of the effect of climate change on flow in Nakdong river basin using watershed-based model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 10, pp. 865-881 (in Korean).
- Stonefelt, M.D., Fontaine, T.A., and Hotchkiss, R.H. (2000). "Impacts of climate change on water yield in the upper wind river basin." *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 321-336.
- Varanou, E.E., Ckouvatsou, E.B., and Mimikou, M. (2002). "Quantity and quality intergrated catchment modeling under climatic change with use of soil and water assesment tool model." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 228-244.
- Wilby, R.L., and Dawson, C.W. (2007). Statistical down-scaling model SDSM Version 4.2 User manual, <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM>.

논문번호: 12-079	접수: 2012.07.09
수정일자: 2012.08.27/09.06/09.10	심사완료: 2012.09.10