

국내 하천에 서식하는 외래종 틸라피아(tilapia)의 잠재적 서식처 확산

왕주현, 한중수, 최준길, 이황구*

상지대학교 생명과학과

Dispersal of potential habitat of non-native species tilapia (*Oreochromis* spp.) inhabiting rivers in Korea

Ju Hyoun Wang, Jung Soo Han, Jun Kil Choi and Hwang Goo Lee*

Department of Biological Science, College of Science & Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- Results of this study provide useful data for establishing management plans for invasive species management.
- They are expected to be used as data to prevent the spread of non-native species tilapia and introduction.

*Corresponding author

Hwang Goo Lee
Tel. 033-730-0434
E-mail. morningdew@sangji.ac.kr

Received: 2 March 2023

First revised: 24 March 2023

Second revised: 9 May 2023

Revision accepted: 15 May 2023

Abstract: Recently, in relation to climate change, many studies have been conducted to predict the potential habitat area and distribution range of tilapia and the suitability of habitat for each species. Most tilapia are tropical fish that cannot survive at water temperatures below 10 to 12°C, although some tilapia can survive at 6 to 8°C. This study predicted habitable areas and the possibility of spreading of habitat ranges of tilapia (*Oreochromis niloticus* and *Oreochromis aureus*) known to inhabit domestic streams. Due to climate change, it was found that habitats in the Geum River, Mangyeong River, Dongjin River, Seomjin River, Taehwa River, Hyeongsan River, and the flowing in East Sea were possible by 2050. In addition, it was confirmed that tilapia could inhabit the preferred lentic ecosystem such as Tamjin Lake, Naju Lake, Juam Lake, Sangsa Lake, Jinyang Lake, Junam Reservoir, and Hoedong Reservoir. In particular, in the case of tilapia, which lives in tributaries of the Geumho River, Dalseo Stream, and the Nakdong River, its range of habitat is expected to expand to the middle and lower of the Nakdong River system. Therefore, it is judged that it is necessary to prepare physical and institutional management measures to prevent the spread of the local population where tilapia currently inhabits and to prevent introduction to new habitats.

Keywords: distribution of tilapia habitat, climate change, prediction of water temperature changes

1. 서 론

나일틸라피아(*Oreochromis niloticus*)와 블루틸라피아(*Oreochromis aureus*)는 아프리카가 원산지인 시클리드

과(Cichlidae)의 열대어로 전 세계적으로 도입되어 양식되고 있다(Trewavas 1983; Molnar *et al.* 2008). 우리나라는 1955년 태국에서 나일틸라피아가 최초 도입되었으며, 이후 일본과 대만 등지에서도 틸라피어를 도입하였다

(Kim and Park 1990). 틸라피아는 빠른 성장과 번식, 높은 생존율, 다양한 환경조건에 내성이 있어 침입성이 높으며(Canonico *et al.* 2005; FAO 2006), 먹이 및 서식처 경쟁, 산란 특성 등으로 인해 토착종의 생물다양성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Canonico *et al.* 2005; Zambrano *et al.* 2006; Attayde *et al.* 2007; Vicente and Fonseca-Alves 2013). 이처럼 새로운 서식처에 유입될 경우 토착종과 수생태계에 부정적인 영향을 미치는 틸라피아 개체군 관리를 위해 국가생물정보기반시설(NBII, National Biological Information Infrastructure)과 IUCN/SSC 침입종 관리 기관(ISSG, Invasive Species Specialist Group)에서는 나일틸라피아와 블루틸라피아를 세계 100대 침입종으로 지정하여 관리하고 있으며(ISSG 2008a, 2008b), 여러 국가에서 틸라피아가 하천으로 유입되는 것을 예방하고, 개체군 확산 방지를 위한 관리방안 마련의 중요성과 필요성에 대해 지속적으로 관심을 가지고 있다(Casemiro *et al.* 2018; Marr *et al.* 2018; Anane-Taabeah *et al.* 2019).

오늘날 하천으로 유입된 틸라피아 대부분은 양식장과 낚시터에서 유입되거나 사람들에 의해 무분별하게 방사된 것으로 보고되어 있으며(Vicente and Fonseca-Alves 2013; Anane-Taabeah *et al.* 2019), 국내 하천에 서식하는 틸라피아 개체군 또한 유사한 방법을 통해 하천에 유입된 것으로 추정된다. 국내 하천에서 틸라피아의 서식이 확인된 것은 2007년 온배수가 유입되는 황구지천에서 나일틸라피아의 서식이 처음으로 확인되었고(Kong *et al.* 2011), 이후 달서천, 금호강, 곡교천 등에서 틸라피아의 서식이 지속해서 보고되어 왔다(NIE 2015; Yoon *et al.* 2018; Wang *et al.* 2020).

틸라피아의 대부분은 열대성 어류로 10~12°C 이하의 수온에서는 서식하지 못하지만(Trewavas 1983; Charo-Karisa *et al.* 2005; FAO 2006), 일부 틸라피아의 경우 6~8°C에서도 생존할 수 있는 것으로 보고되어 있다(Cnaani *et al.* 2000; Charo-Karisa *et al.* 2005; Zhu *et al.* 2016). 이처럼 틸라피아에 따라 수온 내성 범위가 다른 것은 환경적인 영향, 지리적 분포, 개체별 특성, 유전적인 영향 등 다양한 요인들이 작용하기 때문에 틸라피아의 정확한 수온 내성의 최저 온도 범위를 추정하는 것은 매우 어렵다(Cnaani *et al.* 2000). 한편, 국내에 서식하고 있는 틸라피아 개체군의 경우 수온이 12°C 이하로 내려가는 겨울철에

는 온배수가 유입되는 하천에 국한되어 서식하고 있으나 수온이 상승하는 봄부터 가을까지는 서식 범위가 확대되는 것으로 예상된다.

최근 기온과 수온의 상승 등 기후변화와 관련하여 틸라피아의 잠재적인 서식 가능 분포 지역 및 범위를 예측하는 연구(Marr *et al.* 2018), 틸라피아 종별 서식지 적합성 연구(Esselman *et al.* 2013), 침입 가능지역 예측 연구(Casemiro *et al.* 2018) 등 틸라피아를 대상으로 다양한 예측 연구가 수행되었으나, 국내에 서식하고 있는 틸라피아를 대상으로 실시된 연구는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기온과 수온 변화에 근거하여 국내 틸라피아의 잠재적 서식처 확산 가능성 및 분포를 예측하고, 이를 통해 자생 틸라피아의 확산 억제 및 관리방안 마련에 필요한 자료를 제공하고자 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 국내외 서식 분포 조사

나일틸라피아와 블루틸라피아의 전 세계 분포 자료는 세계생물다양성정보기구(GBIF, Global Biodiversity Information Facility)에서 제공하는 Global Biodiversity Database(*O. niloticus*, <https://doi.org/10.15468/dl.aagf4a>; *O. aureus*, <https://doi.org/10.15468/dl.rce4e8>) 자료를 활용하였으며, 문헌조사를 통해 현재 국내 하천에 서식하고 있는 틸라피아의 분포 지역을 확인하였다. 국내외 분포 위치도 및 GIS 분석은 QGIS (Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>)를 사용하여 분석하였다.

2.2. 국내 수온 변화 예측 분석

틸라피아 개체군의 기후변화에 따른 잠재적 분포 영역을 평가하기 위하여 2022~2050년에 잠재적 서식가능 지역을 예측하고자 기온 자료를 이용하였으며, worldclim (<https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html>)에서 제공하는 2010~2018년 연중 최저기온 자료 중 한반도의 기온이 가장 낮은 1월 자료를 선별하여 이용하였다. 또한, 2019~2022년의 1월 기온을 파악하고자 기상청 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에

서 제공하는 천리안위성 2A호의 기상관측 영상자료를 이용하여 분석에 활용하였다. 한반도 지역의 기후변화 RCP 4.5 시나리오는 worldclim (http://www.worldclim.com/CMIP5_30s)의 HadGEM2-AO 모형으로 예측된 2050년대(2040-2060의 평균) 월별 평균 최소 온도를 이용하여 미래 기온 예측 분석을 수행하였다.

틸라피아 생존에 가장 민감하게 반응하는 환경요인인 수온을 이용한 예측 분석을 위해 Stefan and Preud'homme (1993)에 의해 개발된 기존 기온과 수온의 관계 회귀식(Eq. 1)에서, Kim and Kim (2010)이 제시한 우리나라의 환경에 적용하여 개발된 기온과 수온의 관계 회귀식(Eq. 2)을 이용하여 기온을 수온으로 변환하였다.

$$T_{water} = 5.0 + 0.7 \overline{T_{av}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$T_{water} = 4.861 + 0.816 \overline{T_{av}} \quad (\text{Eq. 2})$$

T_{water} : 수온(°C), $\overline{T_{av}}$: 해당 일의 평균 기온

3. 결과 및 고찰

3.1. 나일틸라피아와 블루틸라피아의 국외 서식 분포

세계생물다양성정보기구(GBIF)에 따르면 나일틸라피아는 79개 (<https://doi.org/10.15468/dl.aagf4a>) 국가, 블루틸라피아는 32개 (<https://doi.org/10.15468/dl.rce4e8>)의 국가와 지역 또는 섬에 도입되어 서식하는 것으로 기록되어 있다(Fig. 1). 나일틸라피아는 기니, 코트디부아르, 가나, 토고 등 총 21개의 국가에서 원개체군이 서식하는 것으로 확인되었고, 블루틸라피아는 사우디아라비아, 요르단, 이스라엘, 이집트 등 11개의 국가에서 원개체군이 서식하는 것으로 나타났다. 나일틸라피아와 블루틸라피아 원개체군의 서식 지역이 같은 국가는 세네갈, 감비아, 말리, 니제르, 나이지리아 등 10개의 국가인 것으로 확인되었다. 일반적으로 나일틸라피아와 블루틸라피아는 수온이 8~12°C 이하에서는 서식하지 못하는 것으로 알려져 있는데(Trewavas 1983; Charo-Karisa *et al.* 2005; Zhu *et al.*

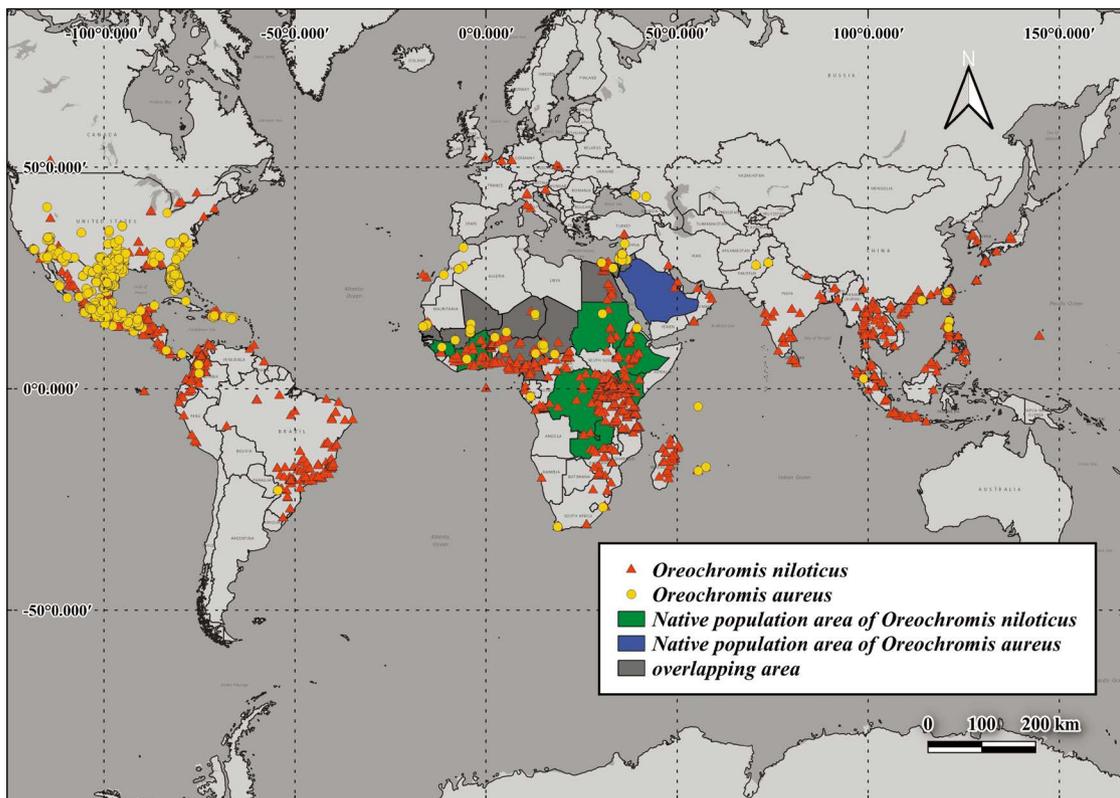


Fig. 1. Current global distribution of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Blue tilapia (*Oreochromis aureus*). Red triangle depicts localities in the *O. niloticus*. Yellow circle depicts localities in the *O. aureus*. Green and blue markers depict localities in the native population. Dark gray markers depict localities where the overlapping of two native population.

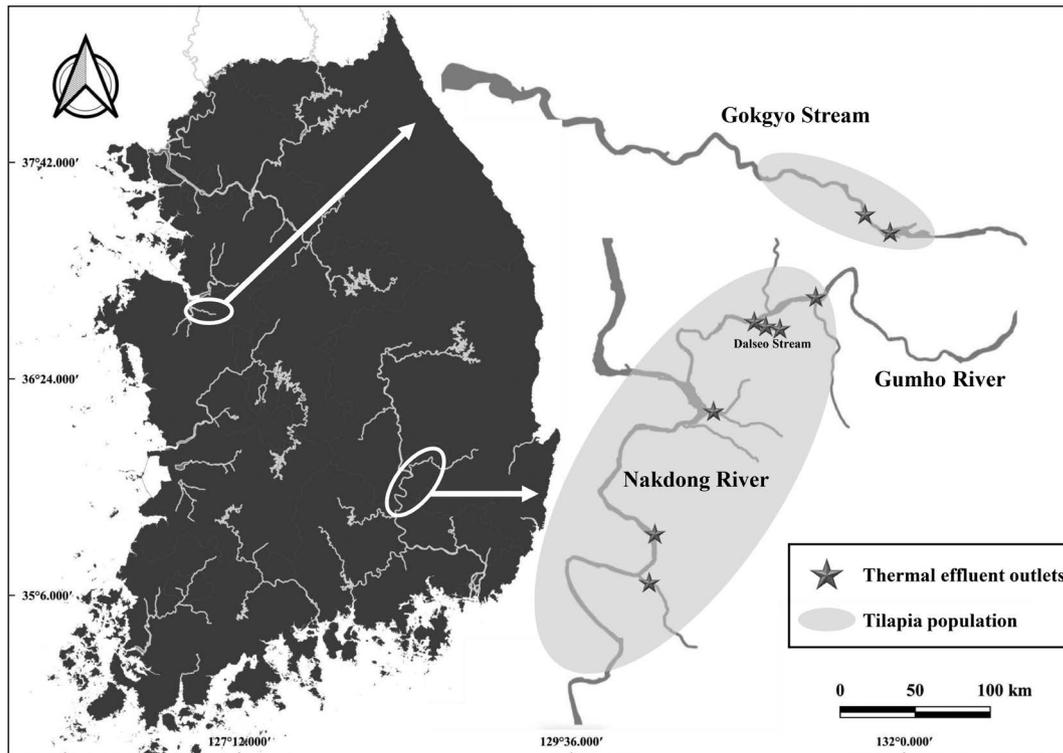


Fig. 2. Distribution of tilapia habitats identified in the references in Korea.

2016), 전 세계적으로 분포하고 있는 나일틸라피아와 블루틸라피아는 대부분 평년기온과 겨울철 기온이 높은 열대지방에 서식하는 것으로 나타났다. 하지만, 겨울철 기온이 영하로 내려가는 캐나다, 영국, 벨기에, 독일, 폴란드, 러시아 등 일부 지역에서 틸라피아 개체군의 서식이 확인되었는데, 이는 서식처 내 온배수가 유입되어 겨울철에도 높은 수온을 유지하고 있거나 비교적 낮은 수온에도 생존할 수 있는 일부 개체들의 적응으로 인해 기온이 낮은 지역임에도 불구하고 서식이 확인된 것으로 판단된다.

3.2. 국내 틸라피아(tilapia) 서식 분포

국내 틸라피아 문헌 조사 결과(Yoon *et al.* 2018; Wang *et al.* 2020), 현재 아산시 곡교천과 대구시 달서천, 온배수가 유입되는 금호강과 낙동강 일대에서 틸라피아의 연중 서식이 확인되었다(Fig. 2). 틸라피아가 연중 서식하고 있는 하천 모두 온배수가 유입되어 상대적으로 높은 수온을 유지하고 있으며, 이로 인해 수온이 낮아지는 겨울철에도 틸라피아의 생존이 가능한 것으로 판단된다. 과거 국내에서 처음 나일틸라피아의 서식이 보고된 황구지천 또한 하

천 주변에서 온배수가 유입되어 겨울철 따뜻한 수온을 유지하고 있어 나일틸라피아의 서식이 가능하였는데(Kong *et al.* 2011), 이후 하천으로 유입되는 온배수의 수온을 낮춰 방류한 결과 현재는 황구지천에서 나일틸라피아가 서식하지 않는 것으로 확인되었다.

3.3. 잠재적 서식처 확산 예측

RCP 4.5 미래 기후 시나리오 자료를 이용해 1월 평균 기온 및 수온을 예상한 미래 기후도를 제작한 결과(Fig. 3), 1월 평균 기온 및 수온이 2050년까지 상승할 경우, 틸라피아 개체군의 서식 가능한 수계가 증가하는 것으로 분석되었다. 1월 평균 기온 및 수온을 기준으로 2022년 틸라피아의 잠재적 서식지는 영산강 하류와 낙동강 하류 일부 구간에 국한되어 있었으나, 기온상승에 따라 2050년에는 금강, 만경강, 동진강, 섬진강, 태화강, 형산강과 동해로 유입되는 하천 등으로 잠재적 서식지가 확대될 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 틸라피아가 선호하는 정수역인 탐진호, 나주호, 주암호, 상사호, 진양호, 주남저수지, 회동저수지 등에도 틸라피아 유입 시 서식이 가능한 것으로 확인되

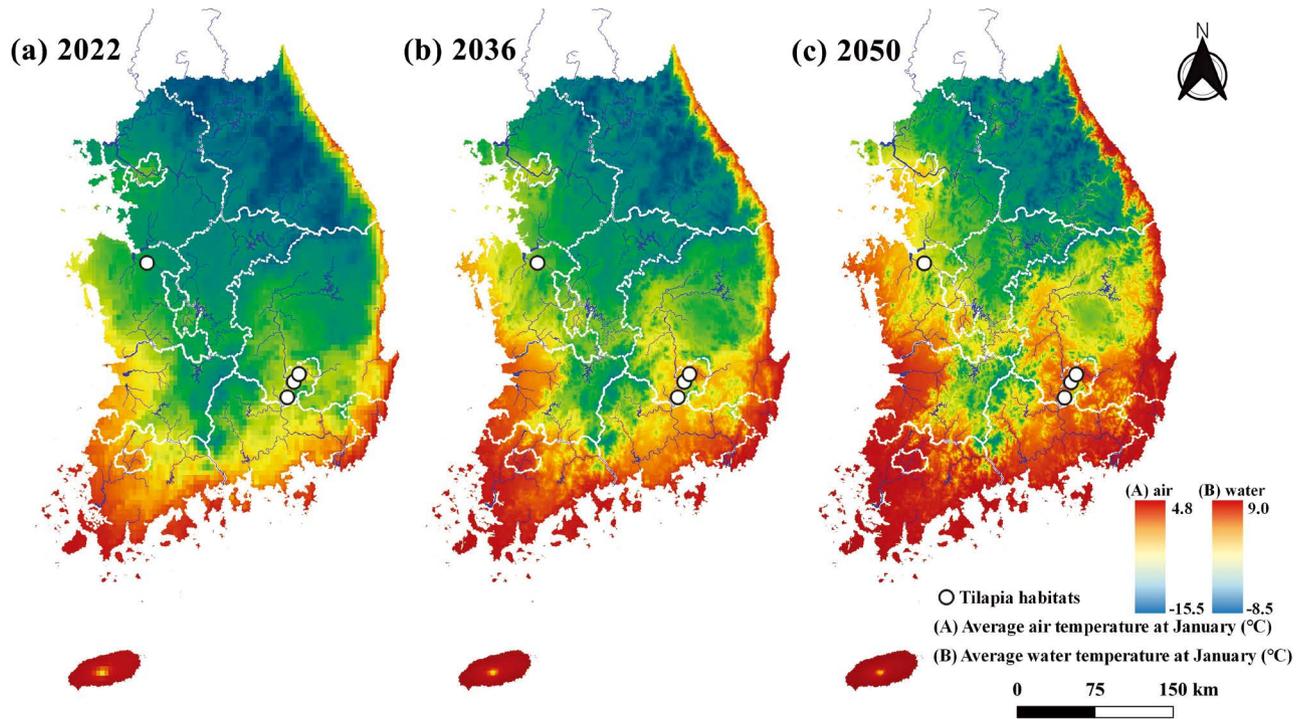


Fig. 3. Changes in air temperature and water temperature distribution by target period in South Korea estimated according to the RCP 4.5 scenario.

었다. 특히 곡교천 개체군의 경우 현재 서식처에서 틸라피아의 서식 분포가 증가할 가능성은 낮은 것으로 확인되었으나, 금호강, 달서천, 낙동강 유입 지류에 서식하고 있는 틸라피아의 경우 기온상승으로 인해 현재 서식 범위에서 낙동강 중·하류권 전역으로 서식처 범위가 확대될 수 있을 것으로 판단된다. 틸라피아는 빠른 성장과 번식, 다양한 환경조건에 내성이 강하며, 토착종과의 서식처 경쟁 및 먹이경쟁에서 우위에 있어 토착종의 서식에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데 (Canónico *et al.* 2005; FAO 2006; Zambrano *et al.* 2006; Gozlan *et al.* 2010), 느린 유속과 단순한 하상구조를 선호하는 틸라피아 개체군이 정수역(호수, 저수지 등)에 이입되면, 높은 적응력으로 인해 토착종과의 먹이경쟁, 서식지 경쟁 등 다양한 부정적인 영향이 발생할 것으로 예측된다. 또한, 비토착종 틸라피아가 유입된 하천과 호수에서는 생물다양성이 감소하고, 생태적 지위가 유사한 종들이 멸종위기에 처해지거나 멸종한 것으로 보고되어 있는데 (Ogutu-Ohwayo 1990; McKaye *et al.* 1995; Gu *et al.* 2015; Outa *et al.* 2020; Peng *et al.* 2021), 향후 기후변화로 잠재적 서식가능 지역이 증가함에 따라 개체군의 서식 범위가 확대되고, 틸라피아 개

체군 확산으로 인해 서식처 내 생물다양성이 감소할 것으로 생각된다. 따라서, 현재 틸라피아가 서식하고 있는 지역 개체군의 확산을 방지하고 새로운 서식처로의 이입을 예방하기 위해 물리적·제도적인 관리방안의 마련이 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 국내 틸라피아 양식장 및 낚시터

국내 틸라피아 양식장 및 낚시터로 이용되고 있는 저수지와 연못은 총 10곳으로 확인되었다(Fig. 4). 현재 국내에는 일부 양식장과 낚시터에서 틸라피아를 사육하여 유통하거나 낚시터(저수지, 연못 등)에 방류하여 낚시꾼들의 레저스포츠로 활용되고 있다. 하지만 저수지와 연못 등지에 방류된 후 관리 소홀 및 장마 시기에 물리적 탈출을 통해 인근 수계로 이입이 발생하거나 산란을 통해 부화한 작은 치어들이 배출구를 통해 주변 하천으로 유입될 가능성이 있다. 현재 국내 하천에 서식하고 있는 틸라피아는 대부분 겨울철 수온이 높은 온배수 하천에서만 서식이 확인되고 있으나 미래 기후 시나리오를 이용한 수온 분석 결과에서는 겨울철 하천 수온이 점차 상승할 것으로 예상되었

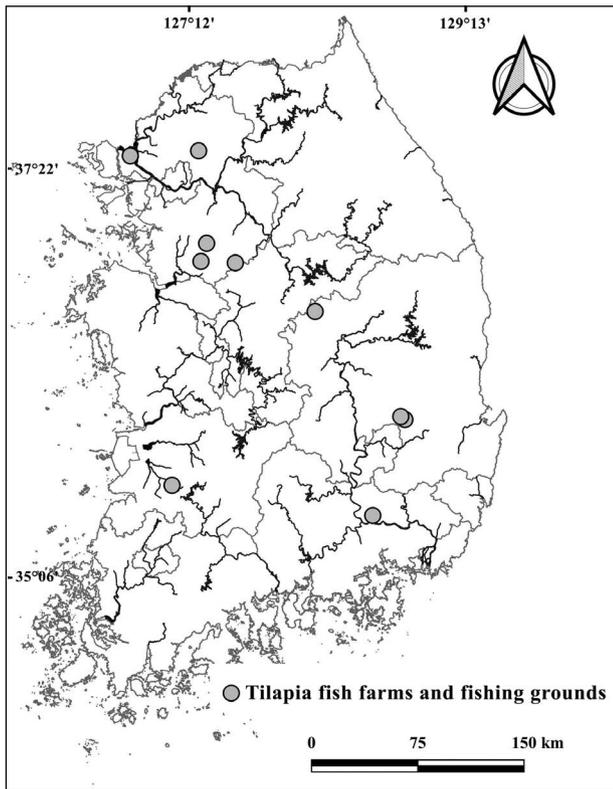


Fig. 4. Distribution of tilapia fish farms and fishing hole in Korea.

다(Fig. 3). 이에 따라 향후 틸라피아가 서식할 수 있는 하천의 범위가 증가할 것으로 예상되며, 틸라피아의 서식이 가능한 하천 주변에 자리 잡은 양식장과 낚시터에서 틸라피아가 탈출하거나, 인위적으로 이입될 경우, 현재보다 많은 지역에서 틸라피아가 서식할 수 있을 것으로 판단된다.

3.5. 잠재적 생태계 위해성

틸라피아는 전 세계적으로 분포하는 침입종이며, 대부분 양식장을 탈출하거나, 인위적인 방생 등을 통해 수생태계로 이입된 것으로 알려져 있다(Costa-Pierce 2003). 틸라피아와 같은 침입종은 자생종의 영양 수준과 먹이 사슬을 변화시켜 담수 생태계의 기능에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Clavero and Garcia-Berthou 2006; Gozlan *et al.* 2010). 특히, 양식에 특화된 hybrid GIFT (Genetically Improved Farmed Tilapia)의 경우 야생개체군(wild population)보다 상대적으로 성장과 번식 속도가 매우 빠르며, 다양한 환경에서 높은 적응력으로 인해 생존율이 높고 침입성이 강한 것으로 보고되어

있다(Canonico *et al.* 2005; FAO 2006). 이에 세계 100대 교란종을 지정·관리하는 기관인 ISSG (Invasive Species Specialist Group)에서는 침입성이 매우 높은 나일틸라피아와 블루틸라피아를 세계 100대 교란종으로 지정하여 관리하였고(ISSG 2008a, 2008b), 현재 브라질, 니카라과, 인도, 남아프리카공화국을 포함한 많은 국가에서 틸라피아 개체군 확산 방지 및 침입종 관리를 위한 물리적인 차단을 통한 유입 예방, 직접 포획을 통한 개체수 조절, 잠재적 포식자를 이용한 생물학적 방제 등 다양한 제도를 마련해 틸라피아를 관리하고 있다(McCrory *et al.* 2007; Bittencourt *et al.* 2014; Marr *et al.* 2018; Anane-Taabeah *et al.* 2019; Singh 2021). 우리나라도 과거 외래생물 정밀 조사 사업을 통해 국내에 서식하고 있는 틸라피아 개체군 조사를 수행하였으며(NIE 2015), 개체군 관리를 위한 설명서(manual)가 작성되어 있다. 그러나 장기적인 모니터링을 통한 틸라피아 개체군이 국내 하천 생태계에 미치는 위해성 평가 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 틸라피아가 서식하고 있는 하천을 대상으로 중·장기적인 모니터링을 통해 서식처 영향 및 틸라피아 개체군의 위해성 평가와 관리 방안에 관한 연구가 시급히 요구된다.

적 요

본 연구는 온배수가 유입되는 대구시 달서천을 대상으로 틸라피아 산란장의 물리적 서식 환경을 파악하고, 나일틸라피아와 블루틸라피아의 국내·외 분포 및 수온에 따른 잠재적 서식 가능지역을 예측하고자 연구를 수행하였다. 나일틸라피아와 블루틸라피아의 국외 서식 현황을 분석한 결과 원개체군이 서식하는 국가를 중심으로 많은 국가와 섬 지역에 도입되어 서식하고 있는 것으로 확인되었고, 상대적으로 추운 지역인 캐나다, 영국, 러시아 등에서도 서식하는 것으로 나타났다. 국내에서는 곡교천, 달서천, 금호강과 낙동강 일대에 서식하는 것으로 조사되었으며, 온배수 유입으로 인해 겨울철에도 높은 수온을 유지하고 있는 하천으로 확인되었다. 현재 국내에서 틸라피아 개체군이 서식 가능한 지역은 영산강 하류와 낙동강 하류에 국한되어 있으나, 2050년에는 기온상승으로 인해 잠재적 서식 가능지역이 금강, 만경강, 동진강, 섬진강, 태화강, 형산강과 동해로 유입되는 하천과 탐진호, 나주호, 주암호, 상

사호, 진양호, 주남저수지, 회동저수지 등 정수역까지 확대될 것으로 예측되었다. 또한 서식 가능지역이 확대되고 틸라피아가 산란할 수 있는 서식처가 증가함에 따라 틸라피아 개체군으로 인해 발생할 수 있는 서식처 교란의 강도가 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 잠재적 위해종이며, 기온상승으로 인해 향후 국내 여러 하천에서 서식 가능성을 가지고 있는 틸라피아 개체군 관리를 위해 틸라피아 개체군이 서식하고 있는 하천을 대상으로 중·장기적인 모니터링을 통한 위해성 평가가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 또한 개체군 확산 방지를 위한 법적·제도적인 규제가 필요하며, 물리적인 포획, 온배수 수온 감소를 통한 제거 등 다양한 관리방안을 마련하고, 틸라피아 개체군으로 인해 발생할 수 있는 서식처 교란을 최소화하는 것이 필요하다.

CRediT authorship contribution statement

JH Wang: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Writing-Original draft, Writing-review & editing. JS Han: Methodology, Data curation, Formal analysis. JK Choi: Conceptualization, Writing-Review. HG Lee: Conceptualization, Supervision, Writing-Review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

- Anane-Taabeah G, EA Frimpong and E Hallerman. 2019. Aquaculture-mediated invasion of the genetically improved farmed tilapia (Gift) into the Lower Volta Basin of Ghana. *Diversity* 11:1–22. <https://doi.org/10.3390/d11100188>
- Attayde JL, N Okun, J Brasil, R Menezes and P Mesquita. 2007. Impactos da introdução da tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus*, sobre a estrutura trófica dos ecossistemas aquáticos do bioma caatinga. *Oecologia Brasiliensis* 11:450–461.
- Bittencourt LS, URL Silva, LMA Silva and MT Dias. 2014. Impact of the invasion from Nile tilapia on natives Cichlidae species in tributary of Amazonas River, Brazil. *Biota Amazôn.* 3:88–94.
- Canonico GC, A Arthington, JK McCrary and ML Thieme. 2005. The effects of introduced tilapias on native biodiversity. *Aquat. Conserv.-Mar. Freshw. Ecosyst.* 15:463–483. <https://doi.org/10.1002/aqc.699>
- Casemiro FAS, D Bailly, WJ da Graca and AA Agostinho. 2018. The invasive potential of tilapias (*Osteichthyes*, *Cichlidae*) in the Americas. *Hydrobiologia* 817:133–154. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3471-1>
- Charo-Karisa H, MA Rezk, H Bovenhuis and H Komen. 2005. Heritability of cold tolerance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, juveniles. *Aquaculture* 249:115–123. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.029>
- Clavero M and E Garcia-Berthou. 2006. Homogenization dynamics and introduction routes of invasive freshwater fish in the Iberian Peninsula. *Ecol. Appl.* 16:2313–2324. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2313:HDAIRO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2313:HDAIRO]2.0.CO;2)
- Cnaani A, GAE Gall and G Hulata. 2000. Cold tolerance of tilapia species and hybrids. *Aquac. Int.* 8:289–298. <https://doi.org/10.1023/A:1009299109614>
- Costa-Pierce BA. 2003. Rapid evolution of an established feral tilapia (*Oreochromis* spp.): the need to incorporate invasion science into regulatory structures. *Biol. Invasions* 5:71–84. <https://doi.org/10.1023/A:1024094606326>
- Esselman PC, JJ Schmitter-Soto and JD Allan. 2013. Spatio-temporal dynamics of the spread of African tilapias (*Oreochromis* spp.) into rivers of northeastern Mesoamerica. *Biol. Invasions* 15:1471–1491. <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0384-9>
- FAO. 2006. Cultured Aquatic Species Information Programme - *Oreochromis niloticus*. Text by Rakocy JE. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations Fisheries and Aquaculture Department. Rome.
- Gozlan RE, JR Britton, I Cowx and GH Copp. 2010. Current knowledge on non-native freshwater fish introductions. *J. Fish Biol.* 76:751–786. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02566.x>
- Gu DE, GM Ma, YJ Zhu, M Xu, D Luo, YY Li, H Wei, XD Mu, JR Luo and YC Hu. 2015. The impacts of invasive Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on the fisheries in the main rivers of Guangdong Province, China. *Biochem. Syst. Ecol.* 59:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.01.004>
- ISSG. 2008a. Global Invasive Species Database (GISD) species profile *Oreochromis niloticus*. Invasive Species Specialist Group. <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Oreochromis+niloticus> (accessed on September, 2022).
- ISSG. 2008b. Global Invasive Species Database (GISD) species profile *Oreochromis aureus*. Invasive Species Specialist Group. <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Oreochromis+aureus> (accessed on September, 2022).
- Kim DS and IS Park. 1990. Genetic identification of hatchery reared tilapia strains. *Journal of Aquaculture* 3:31–37.
- Kim NW and JT Kim. 2010. Modification of stream water temperature calculation equation of SWAT for the Han River Korea using regression analysis. p. 67. In: Proceedings of the 2010

- International SWAT Conference. Seoul, Korea.
- Kong DS, OM Lee, HB Song and MY Song. 2011. Survey and Recovery Measures on the Aquatic Ecosystem of Jinwi Stream. Gyeonggi Research Institute. Suwon, Korea. pp. 78–92.
- Marr SM, G Gouws, S Avlijas, D Khosa, ND Impson, M van der Westhuizen and OLF Weyl. 2018. Record of Blue tilapia *Oreochromis aureus* (Steindachner, 1864) in the Eerste River catchment, Western Cape province, South Africa. Afr. J. Aquat. Sci. 43:187–193. <https://doi.org/10.2989/16085914.2018.1455576>
- McCrary JK, BR Murphy, JR Stauffer and SS Hendrix. 2007. Tilapia (Teleostei: Cichlidae) status in Nicaraguan natural waters. Environ. Biol. Fishes 78:107–114. <https://doi.org/10.1007/s10641-006-9080-x>
- McKaye KR, JD Ryan, JR Stauffer Jr, LJJ Perez, GI Vega and EP van den Berghe. 1995. African tilapia in Lake Nicaragua. Bio-Science 45:406–411. <https://doi.org/10.2307/1312721>
- Molnar JL, RL Gamboa, C Revenga and MD Spalding. 2008. Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. Front. Ecol. Environ. 6:485–492. <https://doi.org/10.1890/070064>
- NIE. 2015. Ecological Studies of Alien Species (II). Department of Eco-Safety Bureau of Conservation Ecology, National Institute of Ecology. Seocheon, Korea. pp. 28–44.
- Ogutu-Ohwayo R. 1990. The decline of the native fishes of lakes Victoria and Kyoga (East Africa) and the impact of introduced species, especially the Nile perch, *Lates niloticus*, and the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Environ. Biol. Fishes 27:81–96. <https://doi.org/10.1007/BF00001938>
- Outa NO, EO Yongo, JLA Keyombe, EO Ogello and D Namwaya Wanjala. 2020. A review on the status of some major fish species in Lake Victoria and possible conservation strategies. Lakes Reserv.: Res. Manag. 25:105–111. <https://doi.org/10.1111/lre.12299>
- Peng L, X Xue, J Liao, J Zhao, Q Tang, Q Lin, Q Zhang and BP Han. 2021. Potential impact of population increases of non-native tilapia on fish catch and plankton structure: a case study of Tangxi Reservoir in southern China. Aquat. Invasions 16:329–348. <https://doi.org/10.3391/ai.2021.16.2.08>
- Singh AK. 2021. State of aquatic invasive species in tropical India: An overview. Aquat. Ecosyst. Health Manag. 24:13–23. <https://doi.org/10.14321/aehtm.024.02.05>
- Stefan HG and EB Preud'homme. 1993. Stream temperature estimation from air temperature. Water Resour. Bull. 29:27–45. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1993.tb01502.x>
- Trewavas E. 1983. Tilapiine Fishes of the Genera *Sarotherodon*, *Oreochromis* and *Danakilia*. British Museum of Natural History. Comstock Publishing Associates. New York.
- Vicente IS and CE Fonseca-Alves. 2013. Impact of introduced Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on non-native aquatic ecosystems. Pak. J. Biol. Sci. 16:121–126. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2013.121.126>
- Wang JH, JK Choi and HG Lee. 2020. The population characteristics of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Dalseo Stream, South Korea. Korean J. Environ. Biol. 38:127–136. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.1.127>
- Yoon JD, JH Kim, SH Park and MH Jang. 2018. The distribution and diversity of freshwater fishes in Korean Peninsula. Korean J. Ecol. Environ. 51:71–85. <https://doi.org/10.11614/KSL.2018.51.1.071>
- Zambrano L, E Martínez-Meyer, N Menezes and AT Peterson. 2006. Invasive potential of common carp (*Cyprinus carpio*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in American freshwater systems. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 63:1903–1910. <https://doi.org/10.1139/f06-088>
- Zhu H, Z Liu, M Lu, F Gao, X Ke, D Ma, Z Huang, J Cao and M Wang. 2016. Screening and identification of a microsatellite marker associated with sex in Wami tilapia, *Oreochromis urolepis hornorum*. J. Genet. 95:283–289. <https://doi.org/10.1007/s12041-016-0653-y>