

Original article

제주 정수장에서 출현한 깔따구과 유충의 형태 및 유전학적 분석

곽인실^{1,2,*} · 박재원² · 김원석² · 박기연¹

¹전남대학교 수산과학연구소, ²전남대학교 해양융합과학과

Morphological and Genetic Species Identification in the Chironomidae Larvae Found in Tap Water Purification Plants in Jeju. *Ihn-Sil Kwak*^{1,2,*} (0000-0002-1010-3965), *Jae-Won Park*² (0000-0002-4067-7089), *Won-Seok Kim*² (0000-0003-3368-3891) and *Kiyun Park*¹ (0000-0003-2965-6970) (¹Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; ²Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)

Abstract The Chironomidae is a benthic macroinvertebrate commonly found in freshwater ecosystems, along with Ephemeroptera and Trichoptera, which can be used for environmental health assessments. There are approximately 15,000 species of Chironomidae worldwide, but there are limited studies on species identification of domestic Chironomidae larvae. In the present study, we carried out species classification of the Chironomidae larvae that found in Jeju's tap water purification plants using morphological characteristics and genetic identification based on cytochrome *c* oxidase subunit I (*COI*) gene of the mitochondrial DNA. Body shape, mentum, antenna, mandible in the head capsule, and claws were observed in the larvae for morphological classification. Analysis of 17 larvae collected from faucets and fire hydrants of domestic tap water purification plants revealed the presence of two species, including 14 *Orthocladius tamarutilus* and 3 *Paratrichocladius tammaater*. These results will aid the use of the criteria information about species classification of the Chironomidae for water quality management in water purification plants and diversity monitoring of freshwater environments.

Key words: Chironomidae, tap water purification plant, morphological classification, mitochondrial DNA, genetic species identification

서론

깔따구(Chironomids)는 저서성 대형무척추동물로 담수 생태계 건강성 평가에서 하루살이 날도래와 같이 흔히 발견되는 주요한 생물로 다양한 환경변화와 유해물질 노출에 대

한 영향을 개체에서 유전자 수준까지 스트레스 반응으로 나타내는 지표종이다(Kwak, 2015, 2020; Mantilla *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019). 깔따구의 생활사는 완전변태로 알-유충(1~4령기)-번데기-성충의 4단계 생활사를 짧게는 3주에서 수개월에 걸친 주기로 성장하기도 하며, 유충시기에는 수중 및 저서에서 서식하고 성충은 곤충 형태로 대기 중으로 이동하여 생활한다(Kwak, 2015). 깔따구 성충은 모기와 유사한 형태를 나타내지만 물지 않는 곤충(Non-biting midge)으로 수환경 동물의 주된 먹이원 역할을 하고 있다(Schaller,

Manuscript received 7 September 2021, revised 15 September 2021, revision accepted 15 September 2021
* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-659-7149
E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr

2014; Allgeier *et al.*, 2019). 또한 먹이원과 환경변화에 따라 체색과 형태가 달라지며 생활사가 비교적 짧아 생태독성학적 평가에 유용한 지표종으로 연구되고 있다(Prat and Maria, 1995; Kim *et al.*, 2019). 전 세계에는 약 15000종의 깔따구가 발견되었다고 보고되었으며(Cranston, 2012), 국내에 보고된 깔따구과는 한국곤충명집 명시된 깔따구아과(Chironomidae), 깃깔따구아과(Orthocladiinae), 늪깔따구아과(Tanyptodinae)의 3아과에 속한 24속 43종이 출현하는 것으로 보고되었다(Korea Insect Collection, 1994; Kwak, 2015). 깔따구는 광범위한 지역적인 분포를 보이고 유충의 형태적 형질이 매우 유사하여, 깔따구 종 동정은 접근하기가 쉽지 않다. 깔따구 유충의 분류는 주로 두부의 구강 내 하순 기절(mentum) 또는 이빨(tooth) 구조, 안테나(antenna), 그리고 체절(segment)로 된 몸의 첫 번째 마디의 전측지(anterior parapod)와 마지막 마디의 후측지(posterior parapod), 강모(setae)의 유무, 항문 세관 및 강모 형태 등을 이용한 형태적인 특징을 적용하여 깔따구 분류가 제한적으로 이루어지고 있다(Kwak, 2015; Kwak *et al.*, 2020). 국내에서 깔따구 유충의 형태적 분류는 1992년 *Chironomus*에 속하는 유충 8종의 복부(Abdomen), 항문(anal) 관찰과, 1998년 서산 논에서 채집한 *Cricotopus oryzaphagos*의 하순기절(mentum), 안테나(antenna), 대악(mandible) 등의 형태 정보가 보고되었다(Yoon *et al.*, 1992; Ree *et al.*, 1998). 하지만 형태적인 특징의 유사성이 높아 구분이 쉽지 않고 깔따구 유충에 대한 연

구가 미미하여 동정이 어려운 현실이다. 이에 수생태계 우점종인 깔따구 유충 분류의 형태적 형질(trait)과 더불어 미토콘드리아 DNA (mitochondrial DNA)를 이용한 유전적 종 동정 정보를 기반으로 한 통합적 분류 연구가 필요하다.

식수원은 인간을 비롯한 살아 있는 생명체의 주요한 자원으로, 수자원의 관리는 생물의 건강성 및 수생태 환경 보호를 위해 매우 중요하다. 하천, 호수와 늪, 지하수 등의 자연수를 정화해서 상수로 공급하는 시설인 정수장의 관리는 깨끗한 수돗물 공급을 위해 엄격하게 관리되어야 한다. 하지만 2020년 인천 정수장 내에서 깔따구 유충이 발견된 이후 전국에 있는 정수장에서 깔따구 유충 발견의 보고가 지속되고 있지만 기본적인 종을 특정하는 정보도 부족해 유충의 발생 원인과 관리방안에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 국내 제주 강정정수장에서 민가로 유출된 깔따구 유충의 종 동정을 위해 외부 형태적 특징 관찰 및 미토콘드리아 DNA기반 유전자 분석을 수행하였다. 이러한 형태적-유전적 깔따구 유충 종 동정 정보는 정수장 수환경관리 및 수질평가, 깔따구 출현 위해성 모니터링을 위한 주요한 기초 정보로 활용될 것이다.

재료 및 방법

1. 국내 수돗물 정수장 깔따구 샘플

본 연구에 사용된 정수장에서 채집된 깔따구 정보는

Table 1. Chironomidae species collected from tap water purification plants in Jeju, Korea.

No	Code	Sampling date	Sampling site	Species	TL (mm)*	HL (mm)**	Volume (mm ³)
1	JJ2010WT	2020-10-23	Water intake tower	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	2	0.2	0.06
2	JJ2010Fau1	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Paratrichocladus tammaater</i>	1	0.1	0.01
3	JJ2010Fau2	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Paratrichocladus tammaater</i>	2	0.1	0.02
4	JJ2010Fau3	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	1.5	0.1	0.01
5	JJ2010Fau4	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	1.5	0.1	0.01
6	JJ2010Fau5	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	2	0.2	0.06
7	JJ2010Fau6	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	2.5	0.4	0.31
8	JJ2010Fau7	2020-10-23	Water treatment plant (Faucet)	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	1.5	0.1	0.01
9	JJ2010YH1	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	3	0.5	0.59
10	JJ2010YH2	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Paratrichocladus tammaater</i>	2	0.2	0.06
11	JJ2010YH3	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	3	0.2	0.09
12	JJ2010YH4	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	2	0.3	0.14
13	JJ2010YH5	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	2	0.2	0.06
14	JJ2010YH6	2020-10-23	Yongheung pressurized fire hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	1.5	0.2	0.05
15	JJ2010SMB1	2020-10-23	Sammaebong water hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	3	0.5	0.59
16	JJ2010SMB2	2020-10-23	Sammaebong water hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	3	0.5	0.59
17	JJ2010SMB3	2020-10-23	Sammaebong water hydrant	<i>Orthocladus tamarutilus</i>	3	0.5	0.59

*TL: Total length, **HL: Head capsule length

Table 1에 기재하였다. 2020년 10월 23일 제주 강정정수장의 취수탑, 정수처리장 내 정수 수도꼭지, 소화관 등 4개 지점에서 총 17마리를 채집하여 80% 에탄올에 보관하였다. 채집한 갈따구 유충은 실험실로 옮겨 각각 채장, 두뚝을 측정하였고, 갈따구의 체형을 고려하여 부피를 산정하였다. 형태 분류를 위해 해부하여 두부와 후측지를 해부한 뒤 마운팅 고정하였고, 유전적 종 동정 연구를 위해 몸통 부분은 80% 에탄올이 담겨 있는 EP Tube에 넣어 실온 보관하였다.

2. 갈따구 형태적 형질 분류

갈따구 종 동정을 위해 각 갈따구 전체적인 형태를 실체 현미경(Olympus, SZX16)으로 관찰 및 촬영 후, 두부와 후측지를 부속지 관찰을 위해 CMC-10을 이용하여 마운팅 슬라이드 표본을 제작하였다. 갈따구 유충 종 동정은 안테나(Antenna), 두부(Head capsule), 대악(Mandible), 하순기절(Mentum), 발톱(Claw) 기반으로 분류키를 관찰하기 위해 slide와 cover slide를 이용하여, Mounting Slide를 제작하고 날짜, 사이트, 부속지를 기록하였다. 슬라이드를 광학현미경(Olympus BX51, Japan)으로 두부는 20 X로 나머지 분류키는 40 X로 관찰 후 촬영하였다.

3. Genomic DNA 추출

갈따구 유충의 total genomic DNA는 몸전체(Whole body)에서 DNeasy Blood & Tissue Kit(QIAGEN)를 이용하여 Protocol에 따라 추출하였다. 실험 과정은 80% 에탄올에 보관된 갈따구 1마리씩 튜브에 담긴 상태에서 에탄올을 버린 뒤, Dry oven에서 40°C로 건조시킨다. 180 µL ATL buffer (20 µL Proteinase K와 10 µL RNase A) 담긴 1.5 mL EP 튜브에 갈따구 유충 샘플을 넣고 호모게나이저 Tip을 이용해 갈아준다. DNA추출을 위한 용해(lysis)과정을 위해 잘 갈아진 조직이 포함된 튜브를 55°C shaking water incubator에 60분 동안 넣어 둔다. Lysis 후 AL buffer를 넣고 centrifuge 후 상등액을 취해 Cool 80% EtOH를 700 mL 넣어 washing을 두 번 한 후 TE buffer로 elution하였다. 추출한 genomic DNA의 농도와 순도는 Micro plate reader (Thermo SCIENRIFIC)를 통해 정량화 하였다. 각 genomic DNA는 다음 실험까지 -80°C 딥프리즈 냉동고(Thermo Fisher Scientific)에 냉동 보관하였다.

4. 갈따구 미토콘드리아 COI 유전자의 PCR 증폭 및 염기서열 분석

Elution한 genomic DNA는 종을 유추하기 위해 Cyto-

chrome c oxidase subunit I(COI) primer를 이용한 PCR(Polymerase chain reaction) 유전자 증폭을 수행하였다. PCR 수행을 위해 Bioneer사에서 제공하는 20 µL AccuPower® PCR PreMix & Master Mix를 사용하였다. 갈따구 COI 유전자를 증폭하기 위하여 F primer: 5'-TTTCTACAAATCATAAAGATATTGG-3' R Primer: 5'-TAAACTTCAGG GTGACCAAAAAATCA-3'를 이용하였다. PreMix & Master mixture에 F, R COI primer (20 mmol L⁻¹)를 1 µL 투여 후, 추출한 갈따구 DNA template (10 ng µL⁻¹)를 Concentration에 따라 정량화하여, final volume은 Nuclease free water로 20 µL를 맞추어 수행하였다. PCR의 온도, 시간 조건은 95°C (7분)간 초기 변성을 거친 후, 95°C (40초) - 50°C (40초) - 72°C (50초)의 조건의 변성, 결합, 합성을 40 cycle을 반복 후, 72°C (7분)를 거쳐 4°C에 보관한다. 증폭한 PCR product는 아가로즈 젤 (1.5%)을 이용하여 전기영동으로 PCR product 사이즈를 확인한다. PCR products는 증폭된 밴드 부분을 조각으로 잘라 PCR gel purification Kit (Solgent, Daejeon, Korea)를 이용해 정제하였다. 정제된 젤 조각들은 Bioneer사의 ABI3730xl DNA Analyzer (Macrogen, Korea)로 Sequencing통해 염기서열을 분석하였다.

5. 데이터 분석

제주 강정정수장에서 발견된 갈따구들의 DNA 염기서열을 통한 유전자 종 동정을 위해 본 연구에서 정수장에서 채집된 갈따구들의 근연 관계를 나타내는 갈따구 종의 상동 서열(homologous sequences)을 NCBI GenBank에서 검색하여 DNA 상관성을 확인하였다. 계통유전학적 분석(phylogenetic analysis)은 Mega X을 이용하여 neighbor-joining tree로 종 간의 근연관계를 분석하였으며, 강정정수장 갈따구와 COI 염기서열 상동성이 높은 종과 다른 국내 정수장에서 나왔던 종들과의 연관관계도 비교 분석하였다.

결과 및 고찰

강정정수장에서 발견된 갈따구 유충의 형태적 종 동정 분류키(안테나, 두부, 대악, 하순기절 및 발톱)를 분석하였다. 갈따구 유충의 두부와 전측지는 단단한 큐티클로 보호되어 있어 하상입자인 모래여과지에 부착하거나 파고드는 것이 가능한 단단한 발톱도 가지고 있다. 또한 유충은 먹이 섭취를 위해 구강 내 대악과 하순기절이 적합한 구조를 갖추고 있다(Figs. 1, 2).

강정정수장 내(정수처리장 정수, 용흥가압장 소화전, 삼매

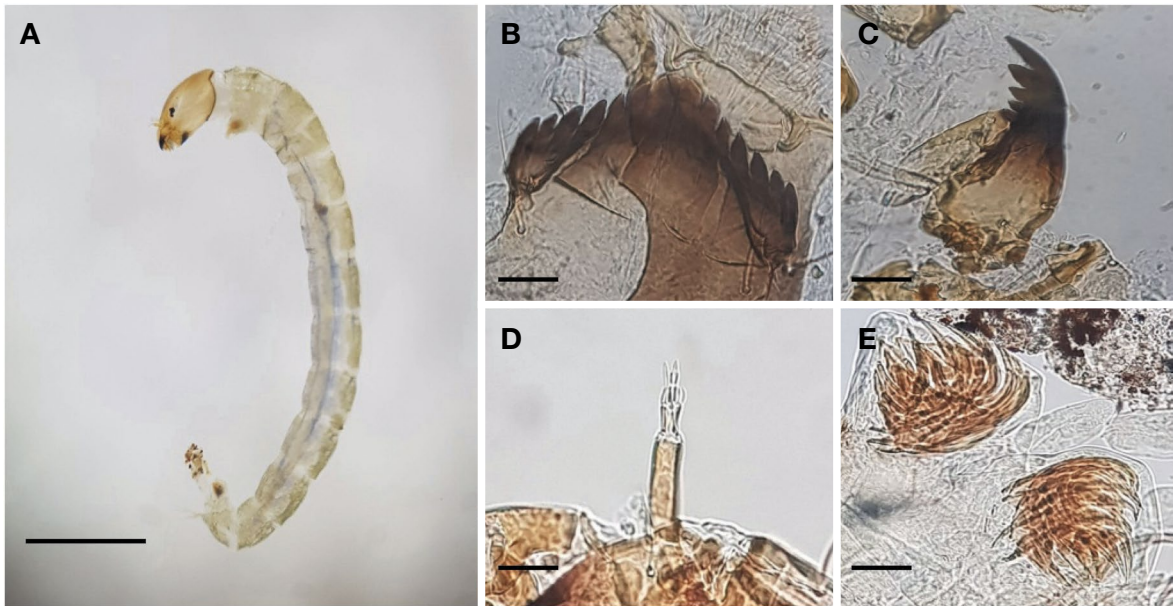


Fig. 1. Morphological classification in *Orthocladius tamarutilus* (A): Body, (B): Mentum, (C): Mandible, (D): Antenna, (E): Claw, Scale bars (A) = 500 μ m, (B)~(E) = 50 μ m.

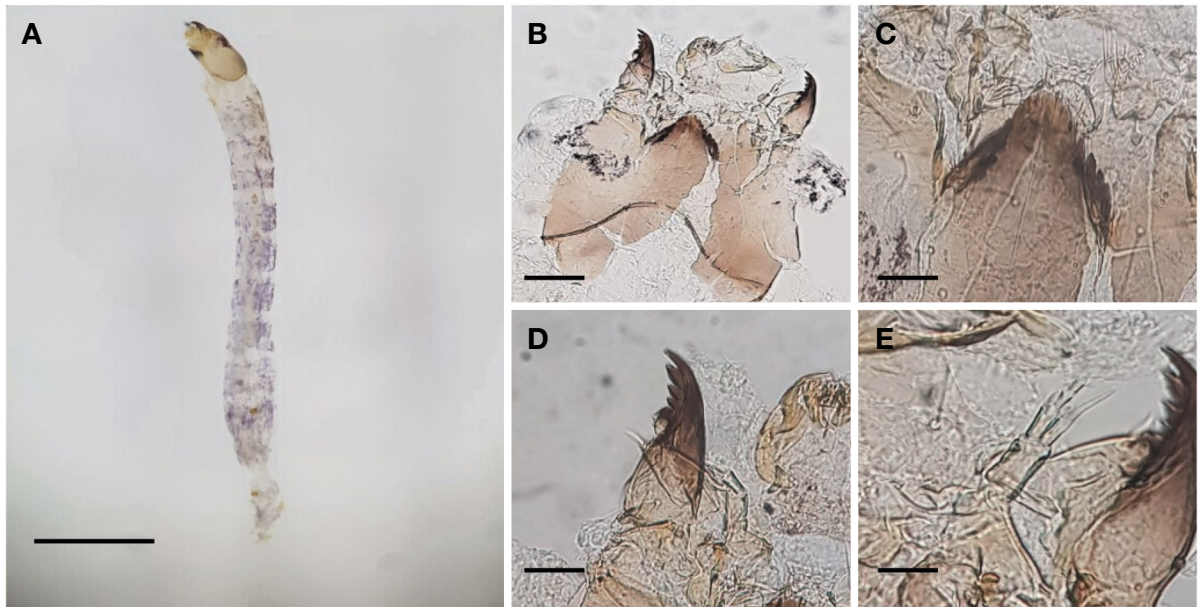


Fig. 2. Morphological classification in *Paratrichocladius tammaater* (A): Body, (B): Head capsule, (C): Mentum, (D): mandible, (E): Antenna, Scale bars (A) = 500 μ m, (B)~(E) = 50 μ m.

봉 배수지 소화전)에서 발견된 17개체 중 본 연구에서 형태적-유전적 종 동정 결과 채집된 깔따구류는 Orthocladiinae (깃깔따구아과)에 속하는 *Orthocladius tamarutilus* (둥근깃깔따구)와 *Paratrichocladius tammaater* (타마긴털깔따구)로 총 2종이었다. 정수장에서 발견된 17개체 깔따구들의 평균

전체장은 2 mm, 직경은 0.23 mm, 부피는 1.5 mm³으로 측정되었으며 (Table 1), 깔따구 유충 발생단계 (1~4령기) 중 1~2령기에 속하는 개체들이다.

관찰된 개체들 중 둥근깃깔따구 (*O. tamarutilus*)는 전체장이 1~2 mm로 전체적인 몸의 채색은 옅은 녹색으로 관찰

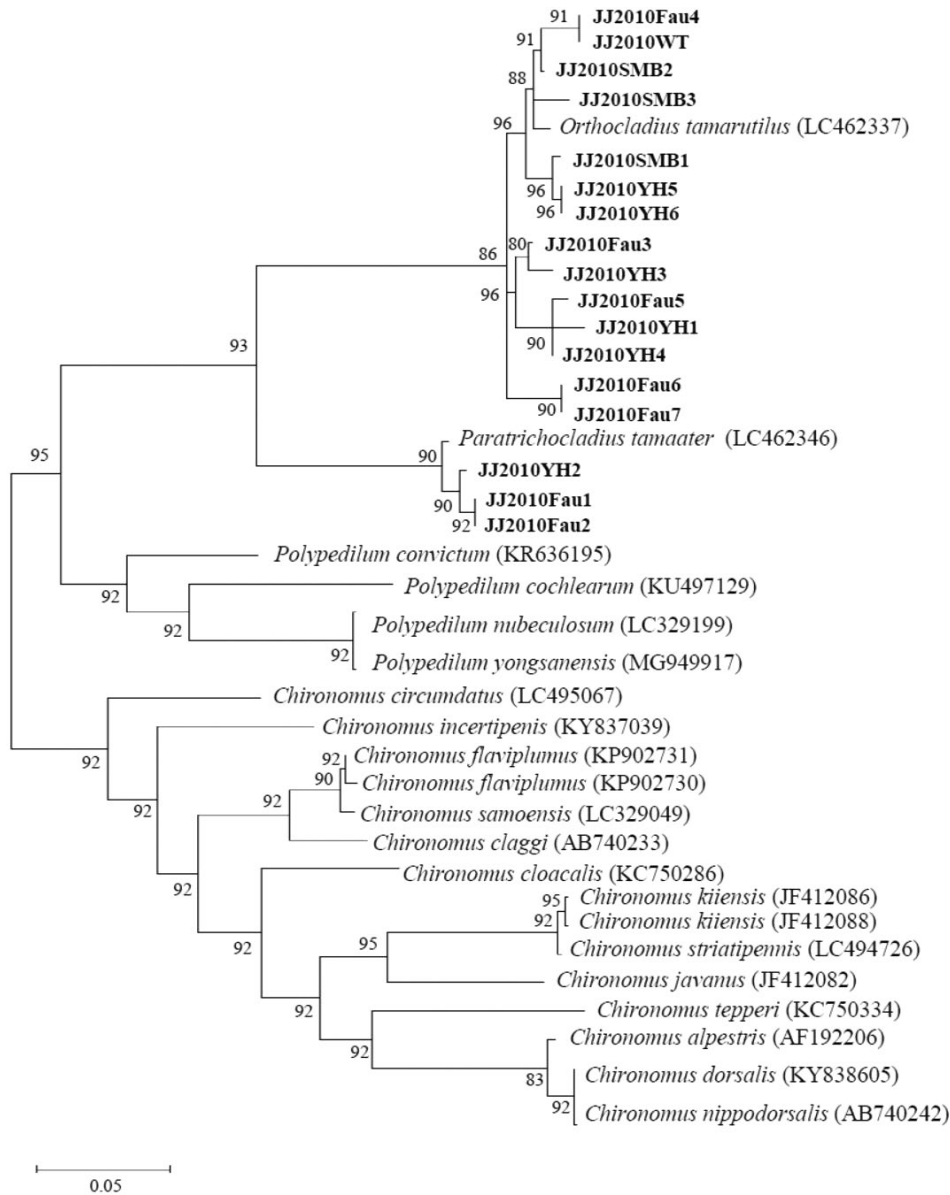


Fig. 3. Phylogenetic tree of the COI sequences in 19 species of the *Chironomus* with 17 individuals from Jeju constructed by neighbor-joining analysis (bootstrap value 1000). The numbers at the nodes are the percentage bootstrap values. The bold letter indicated to 17 individuals collected from Jeju purification plants.

되었다. 하순기절은 총 13개 teeth로 median teeth (MT) 1개, lateral teeth (LT) 6쌍으로 6LT-1MT-6LT 형태로 관찰되었으며, median teeth 가운데 teeth는 넓고 둥근 모양이다(Fig. 1B). 대약은 1개의 apical teeth와 4개의 inner tooth가 있으며 3번째 teeth가 4번째 teeth보다 작으며 검정색으로 나타났다(Fig. 1C). Antenna는 5개의 segment로 구성되었으며, ring organ은 첫 번째 마디 1/5에 위치하며, Blade는 5번째 길이만큼의 길이이다. 후측지에 claw가 관찰되었다(Fig. 1D

and 1E). 타마긴털갈따구(*P. tammaater*)는 전체장이 1~2 mm로 전체적인 채색은 옅은 검정색이다. 하순기절은 총 13개의 teeth로 median teeth 1개, lateral teeth 6쌍으로 6LT-1MT-6LT 형태로 관찰되었다(Fig. 2B). 1, 2번째 lateral tooth가 거의 붙어있으며, 둥근 balloon 모양이다. 대약은 1개의 apical teeth와 4개의 색이 검정색인 inner teeth가 나타났으며, 4번째 inner teeth는 평평한 모양으로 나타난다(Fig. 2D). Antenna는 5개의 segment로 구성되며, ring organ은 첫번째

마디의 1/3에 위치하고, Antenna Blade의 길이는 5번째 마디보다 길었으며, 옆에 accessory blade가 있다(Fig. 2E).

두 종의 체색은 다른 색을 띠지만, 부속지 등의 형태는 거의 유사하였다. 깔따구 유충의 형태적인 종 동정은 경화되어 있는 두부의 안테나, 구강의 대악, 하순기절 등 다양한 부속지의 배열, 형태 등에 따라 이루어지며, 먹이나 서식환경에 따라 유충의 체색은 변이로 다양하게 나타날 수 있어 체색으로 구분하는 것은 오동정을 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 분석하기 위한 대상 종의 개체수 또는 반복수를 늘려 분류기에 대한 정밀한 형태적 분석이 전문가에 의해 수행되어야 한다(Kwak, 2015; Kwak *et al.*, 2020). 강정정수장 내 취수탑에서는 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*) 1개체, 정수처리장에서는 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*) 5개체, 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 2개체, 용흥가압장 소화전에서는 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*) 5개체, 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 1개체, 삼대봉 배수지 소화전에서는 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 3개체가 확인되었다(Table 1).

국내 수돗물 정수장에 처음으로 깔따구 유충에 대한 종 동정 결과가 보고된 인천 공촌정수장에서 발견된 깔따구는 Chironominae에 속하는 등깔따구(*Chironomus dorsalis*), 노랑털깔따구(*Chironomus flaviplumus*), 안개무늬날개깔따구(*Chironomus kiiensis*) 3종, 용산무늬깔따구(*Polypedilum yongsanensis*) 1종으로 전체장 5~9 mm, 두폭 0.5~1.5 mm 부피 1~15.9 mm³ 크기를 보인 반면에 강정정수장에서 출현한 깔따구 유충은 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*), 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 2종으로 전체장 1~3 mm, 두폭 0.1~0.5 mm, 부피 0.01~0.59 mm³로 인천에서 출현한 종에 비해 크기가 매우 소형으로 분석되었다(Kwak *et al.*, 2020). 제주 강정정수장에서 발견된 2종은 국내에서 생태적 연구가 충분하지 않는 종으로 앞으로 국내 서식 종을 대상으로 한 형태, 유전 및 생태학적 연구의 필요성이 강조된다.

깔따구 미토콘드리아 DNA의 COI 유전자의 부분 염기서열을 기반으로 계통진화적 분석(Phylogenetic analysis)을 수행하였다(Fig. 3). NCBI Genbank에 등록된 깔따구 COI 염기서열을 분석한 결과 14개체(JJ2010WT, JJ2010Fau3, JJ2010Fau4, JJ2010Fau5, JJ2010Fau6, JJ2010Fau7, JJ2010YH1, JJ2010YH3, JJ2010YH4, JJ2010YH5, JJ2010YH6, JJ2010SMB1, JJ2010SMB2, JJ2010SMB3)는 NCBI에 등록된 깃깔따구과(LC462337)와 같은 계통군을 형성하였고, 3개체(JJ2010Fau1, JJ2010Fau2, JJ2010YH2)는 타마긴털깔따구(LC462346)같은 계통군을 형성하였다. 인천에서 발견된 깔따구 *Chironomus*와 *Polypedilum*속 종들과는 다른 계통군을 형성하였다(Kwak *et al.*, 2020). 이러한 결과는 미토콘드리아 DNA기반 유전자 종 동정을 통한 깔따구

유충이 발견된 정수장에 따라 다양하게 분류됨을 나타낸다.

깔따구 유충은 국내뿐 아니라 전 세계적으로 널리 분포되어 있지만, 형태가 유사하여 속, 종의 동정의 어려움을 겪고 있다(Lee and Kim, 1998). 이에 COI primer를 이용한 DNA 염기서열을 이용한 종 동정의 연구가 진행된다(Carew *et al.*, 2007, 2015; Kim *et al.*, 2012). 하지만 유전적인 연구는 종을 추정하지만 형태적 특징 정보 없이 분류가 진행되기에 때때로 오동정을 일으킨다. 이에 본 연구에서는 제주 정수처리장에서 발견된 깔따구 유충들의 종 동정을 형태 및 DNA 유전 연구를 통해, 형태 사진 및 염기서열 자료를 비교하였다. 본 연구를 통해 정수장 환경에서 깔따구 유충의 발생에 대한 종은 발견된 지역 및 정수장 환경별로 크기도 종도 다양하게 나타나기에 수자원 관리 및 수질 모니터링을 위한 전국 정수장 환경 내 깔따구 유충에 대한 기초 분류 자료가 더욱더 축적되어야 한다. 이러한 자료는 향후 정수장 내 발견되는 깔따구의 생활사 및 서식환경에 대한 정보와 함께 수환경 관리방안을 제시하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

적 요

깔따구(Diptera: Chironomidae)는 저서성 대형무척추동물로 환경 및 수질 변화에 민감한 영향을 받는 중요한 환경 지표생물이다. 이러한 깔따구 유충이 정수장에서 본 연구에서는 제주 정수처리장에서 발견된 깔따구 유충의 종을 분류하기 위해 형태 사진 및 COI(cytochrome c oxidase subunit I) Primer로 증폭시킨 DNA의 염기서열을 계통수 분석을 통해 분석을 실시하였다. 정수장 내 수도꼭지와 소화관 등에서 채집된 17개체는 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*) 14개체, 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 3개체 총 2종으로 확인되었다. 각 깔따구 종의 형태적 특징은 두부, 하순기절, 대악, 안테나, 발톱의 형태적 특징의 분류기로 종 동정하였다. NCBI Genbank에 등록된 깔따구 19종 COI 염기서열을 기반으로 본 연구에서 조사된 17개체의 계통진화적 분석 결과 채집된 깔따구 COI 염기서열이 둥근깃깔따구(*O. tamarutilus*)와 타마긴털깔따구(*P. tammaater*) 2종으로 각각 계통군(clade)을 이루는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 정수장 환경별 발견되는 깔따구 유충의 다양성의 확인과 형태적-유전적 종 동정 분류정보를 바탕으로 수환경 관리 및 평가를 위한 기반 정보로 활용될 것이다.

저자정보 광인실(전남대학교 교수), 박재원(전남대학교 석사과정생), 김원석(전남대학교 박사과정생), 박기연(전남대학교 연구교수)

저자기여도 개념설정: 곽인실, 방법론: 곽인실 & 박기연 & 김원석, 분석: 곽인실 & 박기연 & 박재원 & 김원석, 자료제공: 곽인실 & 박기연 & 박재원, 자료관리: 곽인실 & 박기연 & 박재원, 원고 초안작성: 박기연 & 박재원, 원고 교정: 곽인실 & 박기연 원고 편집 및 검토: 곽인실 & 박기연, 과제관리: 곽인실, 연구비 수주: 곽인실. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 이 논문은 한국연구재단 중점연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 [NRF-2018-R1A6A1A-03024314], [NRF-2020-R1A2C-1013936].

REFERENCES

- Allgeier, S., A. Kastel, C.A. Bruhl. 2019. Adverse effects of mosquito control using *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*: reduced chironomid abundances in mesocosm, semi-field and field studies. *Ecotoxicology Environmental Safety* **169**: 786-796.
- Anderson, R.L. 1980. Chironomidae toxicity tests - biological background and procedures, p. 70-80. *In*: Aquatic invertebrate bioassays (Buikema, A.L. Jr and J. Jr Cairns, eds.), ASTM STP 715. American Society for Testing and Materials, PA.
- Armitage, P.D., L.C. Pinder and P. Cranston. 1995. The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-biting Midges. Springer, Netherlands.
- Armitage, P.D., L.C. Pinder and P.S. Cranston (eds.). 2012. The Chironomidae: biology and ecology of non-biting midges. Springer Science & Business Media.
- Carew, M.E., V. Pettigrove, R.L. Cox and A.A. Hoffmann. 2007. DNA identification of urban Tanytarsini chironomids (Diptera: Chironomidae). *Journal of the North American Benthological Society* **26**: 587-600.
- Carew, M.E., V. Pettigrove, V.J., Metzeling and A.A. Hoffmann. 2013. Environmental monitoring using next generation sequencing: rapid identification of macroinvertebrate bioindicator species. *Frontiers in Zoology* **10**: 1-15.
- Kim, S., K.H. Song, H.I. Ree and W. Kim. 2012. A DNA barcode library for Korean Chironomidae (Insecta: Diptera) and indexes for defining barcode gap. *Molecular Cell* **33**: 9-17.
- Kim, W.S., C. Hong, K.Y. Park and I.S., Kwak. 2019. Ecotoxicological response of Cd and Zn exposure to a field dominant species, *Chironomus plumosus*. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 266-273.
- Kwak, I.S. 2015. Introduction to the Chironomidae as a water pollution indicator. Chonnam National University Press, pp 13-156.
- Kwak, I.S., J.W. Park., W.S. Kim and K.Y. Park. 2020. Morphological and Genetic Species Identification in the Chironomus Larvae (Diptera: Chironomidae) Found in Domestic Tap Water Purification Plants. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 286-294.
- Mantilla, J.G., L. Gomes and M.A. Cristancho. 2018. The differential expression of *Chironomus* spp genes as useful tools in the search for pollution biomarkers in freshwater ecosystems. *Briefings in Functional Genomics* **17**: 151-156.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2020. Cadmium-induced developmental alteration and upregulation of serine-type endopeptidase transcripts in wild freshwater populations of *Chironomus plumosus*. *Ecotoxicology Environmental Safety* **192**: 110240.
- Prat, N. and M. Rieradevall. 1995. Life cycle and production of Chironomidae (Diptera) from Lake Banyoles (NE Spain). *Freshwater Biology* **33**: 511-524.
- Ree, H.I. and J.Y. Kim. 1998. A New Species of the Genus *Cricotopus* (Diptera: Chironomidae), a Pest of Rice in Seosan, Korea. *Korean Journal of Biological Sciences* **2**: 309-313.
- Schaller, J. 2014. Bioturbation/bioirrigation by *Chironomus plumosus* as main factor controlling elemental remobilization from aquatic sediments? *Chemosphere* **107**: 336-343.
- The Entomological Society of Korea. 1994. Korea Insect Collection. Konkuk University Press.
- Yoon, I.B. and D.J. Chun. 1992. Systematic of the Genus *Chironomus* (Diptera: Chironomidae) in Korea. *Entomological Research Bulletin* **18**: 1-14.