

확률분포모형을 이용한 하루살이속(*Ephemera*) 4종에 대한 화학적 수질 적합도지수 평가

정봉준^{a,*} · 공동수^b

경기대학교 생명과학과

Estimation on Chemical Water Quality Suitability Index for 4 Species of the Mayfly Genus *Ephemera* (Ephemeroptera: Ephemeridae) Using Probability Distribution Models

Bongjun Jung^{a,*} · Dongsoo Kong^b

Department of Life Science, Kyonggi University

(Received 20 October 2023, Revised 27 November 2023, Accepted 28 November 2023)

Abstract

Chemical water quality suitability for species (*Ephemera strigata*, *Ephemera separigata*, and *Ephemera orientalis-sachalinensis* group) of the mayfly genus *Ephemera* (Order Ephemeroptera) was analyzed with probability distribution models (Exponential, Normal, Lognormal, Logistic, Weibull, Gamma, Beta, Gumbel). Data was collected from 23,957 sampling units of 6,664 sites in Korea from 2010 to 2021. *E. orientalis-sachalinensis* occurred at the range of BOD₅ 0.3~11.1 mg/L (the best-fit Lognormal model); T-P 0.007~0.769 mg/L (the Gumbel model); TSS 0.4~142.2 mg/L (the Lognormal model). *E. strigata* occurred at the range of BOD₅ 0.4~7.4 mg/L (the Gumbel model); T-P 0.007~0.254 mg/L (the Lognormal model); TSS 0.4~17.1 mg/L (the Lognormal model). *E. separigata* occurred at the range of BOD₅ 0.4~2.6 mg/L (the R-Weibull model); T-P 0.007~0.134 mg/L (the Lognormal model); TSS 0.7~10.0 mg/L (the Lognormal model). Habitat suitability range of *E. orientalis-sachalinensis* was estimated to be 0.4~1.9 mg/L (BOD₅), 0.024~0.086 mg/L (T-P), 2.5~22.4 mg/L (TSS); that of *E. strigata* was 0.4~0.7 mg/L (BOD₅), 0.007~0.018 mg/L (T-P), 0.0~1.7 mg/L (TSS); that of *E. separigata* was 0.0~0.4 mg/L (BOD₅), 0.000~0.015 mg/L (T-P), 0.5~3.1 mg/L (TSS). In a relative comparison, *E. orientalis-sachalinensis* was estimated to be eurysaprobic, and narrowly adapted in high levels of T-P and TSS, *E. strigata* was estimated to be oligosaprobic and adapted in low levels of T-P and TSS, and *E. separigata* was estimated to be stenooligosaprobic and widely adapted in low level of T-P and TSS.

Key words : Chemical water quality, *Ephemera*, Eurysaprobic, Habitat suitability index, Oligosaprobic, Stenooligosaprobic

^a 석사과정(Master student), jjun0491@nate.com, <http://orcid.org/0009-0005-8866-0971>

^b Corresponding author, 교수(Professor), dkong@kgu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0001-8438-3229>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

하루살이목 중 하루살이속(*Ephemera*)은 국내의 다양한 하천이나 강에서 매우 풍부하게 분포하는 저서성 대형무척추동물이며(Lee et al., 1995) 동양하루살이(*E. orientalis*), 사할린하루살이(*E. sachalinensis*), 무늬하루살이(*E. strigata*), 가는무늬하루살이(*E. separigata*)가 기록되어 있다(Bae, 1995; Hwang, 2007). 이들과 관련하여 남양주시 수동천에서 무늬하루살이와 동양하루살이의 분포(Lee et al., 1995), 치악산 일대 산간계류 수서곤충의 분포(Park et al., 1997), 치악산 계류에서 가는무늬하루살이와 무늬하루살이의 온도와 연관된 생활사(Lee et al., 1999), 동양하루살이의 생활사(Lee et al., 2008), 미토콘드리아 CO1 유전자의 염기서열 분석을 통한 분류학적 연구 및 고도에 대한 적응범위(Hwang et al., 2013), 확률밀도함수를 이용한 전국범위의 고도에 대한 분포구계(Kong and Kang, 2023) 및 물리적 미소서식처에 대한 분포구계(Kong and Song, 2023)에 대한 연구가 진행되었다.

국내의 다른 수서곤충 분류군에 비하여 하루살이속에 대한 연구는 비교적 많이 이루어졌다고 할 수 있으나 그간의 연구는 주로 분류 및 분포의 고도구계와 미소서식처에 관한 것이었으며 이들과 화학적 수질요인에 대한 연구는 미흡하다. 현재까지 하루살이속 생태의 연구결과로는 동양하루살이는 비교적 유속이 느리고 하상이 모래나 잔돌(gravel) 및 유기물로 구성된 수폭이 넓은 강에서 출현하고(Hwang et al., 2013), 사할린하루살이는 비교적 깨끗한 하류의 평지하천에 분포하며(Hwang et al., 2003; Tshernova, 1973), 무늬하루살이와 가는무늬하루살이는 비교적 수온이 낮고 조립질 하상으로 구성된 산지하천에서 출현(Hwang et al., 2013)하는 것으로 알려져 있으나 이러한 결과는 정성적인 수준에서 도출된 것이었다.

본 연구는 국내의 전국적인 범위의 하천에서 장기간에 걸쳐 축적된 자료를 바탕으로 하루살이속 내 분류군들의 화학적 환경요인(BOD, T-P, TSS)에 대한 적합도를 확률밀도함수를 적용하여 정량적으로 밝힌 것이다. 생화학적 산소요구량(BOD)은 서식처 내의 유기물과, 총 인(T-P)은 서식처 내의 조류와, 총 부유물질(TSS)은 하천의 탁도 및 서식처 내의 조류의 광합성과 밀접한 관계를 가지며 이들은 모두 하천의 부영양화와 저서성 대형무척추동물의 군집특성에 큰 영향을 미친다(Kim et al., 2018).

연속 확률분포 분석은 출현도를 기반으로 한 이산적인 분석에 비하여 환경요인의 모든 값에 대하여 분류군의 출현특성을 연속적으로 해석할 수 있고 서식처 적합도를 확률기반의 함수식으로 제시할 수 있다는 점에서 이점이 있다(Kong and Kang, 2023). 국내에서 저서성 대형무척추동물의 출현특성을 분석함에 있어 확률분포모형이 적용된 사례는 조사면적-종수 관계 해석(Kong and Kim, 2015)과 물리적 서식처 적합도 지수 산정(Kim and Kong, 2018; Kong and Kim, 2017)이 있으나 해당 연구에서 적용된 분포모형은 베이블분포모형(Weibull distribution model)에 국한된 것이었다. 최근에 Kong and Kang (2023) 및 Kong and Song (2023)은 하루

살이속 내 분류군들의 고도와 물리적 미소서식처에 대한 서식처 적합도 분석에서 다양한 확률밀도함수를 적용한 분석을 진행하였으나 화학적 환경요인에 대한 하루살이속 내 분류군들의 서식처 적합도 분석은 본 연구가 처음이다. 본 연구의 결과는 화학적 환경요인이 하루살이속 분류군의 서식처에 어떠한 영향을 미치는지 파악하는데 사전자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. Materials and Methods

2.1 자료 수집

본 연구에 이용된 자료는 한강물환경연구소의 “기후변화가 수생태계에 미치는 영향과 대응전략(‘10~’12)”, 환경부의 “환경생태유량 산정기준 연구 및 시범 산정(‘14)”, 환경부·국립환경과학원의 “수생태계 건강성 조사 및 평가(‘12~’13)”, “하천 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가(‘14~’21)”, “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 마련 연구(‘18)”, “4대강 보 개방에 따른 수생태계 변화 조사(‘18~’20)”, 국립환경과학원의 “생물측정망 모니터링 및 평가기법 개발연구(‘17)”의 지점 또는 정점 조사 결과의 일부였으며 총 표본단위는 23,957개였다. 이 중 환경부 물환경측정망의 수질측정자료가 없는 지점의 생물조사자료는 생물과 수질과의 상관성 분석을 위해 사용할 수 없으므로 분석에서 제외하였다. 수질과 생물이 조사된 지점에서의 연중 또는 연간 반복된 조사를 포괄한 총 조사지점은 총 6,664개였다. 각 조사지점은 민통선 이남에서 제주도, 서해안 접경부터 동해안 접경, 해발고도 0 m부터 888 m까지 전국적인 범위를 포괄한 것이었다. 각 조사단위의 자료는 하루살이속 약충의 출현유무와 해당 조사지점의 수질에 대한 것이며 성충에 대한 조사결과는 포함되지 않은 것이다.

하루살이속 중 동양하루살이와 사할린하루살이는 약충 단계에서는 구분이 쉽지 않아 본 연구에 사용된 자료의 대부분은 동정 단계에서 사할린하루살이가 동양하루살이에 포함되어 기록된 것들이고 두 종은 동소서식하는 것으로 알려져 있으므로(Hwang et al., 2013), 이를 동양하루살이-사할린하루살이 군으로 묶어서 분석하였다.

본 연구에서 고려한 화학적 환경요인은 하천의 유기오염을 대표하는 주요 항목인 5일 BOD (5-day biochemical oxygen demand, BOD₅) 농도와, 총인(Total phosphorus, T-P) 농도 및 총부유물질(Total suspended solids, TSS) 농도였다. 사용된 수질자료는 조사지점 중 환경부 물환경측정망의 수질 측정망과 일치하는 지점에 해당하는 것만 선별하여 사용하였다.

2.2 조사자료

저서성 대형무척추동물 자료는 수심이 얇은 곳에서는 Surber net 또는 D-frame net을 사용하였고 이들을 사용할 수 없는 수심이 깊은 곳에서는 Dredge, Ekman grab 또는 Ponar grab으로 정량채집되어 동정 및 계수된 개체수 밀도였다.

2.3 통계분석

2.3.1 출현도 분석

국내의 저서성 대형무척추동물과 환경요인의 관계분석에서 Yoon et al. (1992)은 평균출현밀도를 적용하였고, Kim et al. (2018), Kong and Kang (2023), Kong and Song (2023) 및 Kong et al. (2013)은 상대출현빈도를 적용하였으며, Kong and Kim (2017), Kong and Kim (2016), Kong and Yeo (2023), Kong et al. (2018)는 Dufrene and Legendre (1997)의 연구사례에 따라 복합출현도(평균출현밀도×상대출현빈도)를 적용한 바 있다. 본 연구와 연관성이 깊은 Kong and Kang (2023)의 연구에서는 하루살이속 내 분류군의 고도에 따른 분포구계를 파악하는데 중점을 두고 상대출현빈도를 적용한 바 있다. 본 연구는 같은 고도 구간에서 수질에 대한 선호도에 따라 각 분류군의 출현도가 다를 수 있기 때문에 화학적 환경요인의 구계에 따른 복합출현도를 적용하였다.

복합출현도는 특정 분류군의 출현개체수와 출현빈도를 각각 독립적으로 보고 복합하여 고려하기 때문에 어떤 분류군이 특정 계열에 대해 상대출현빈도는 물론 평균출현밀도도 높아지는 경우 해당계열에 대한 값이 커지게 된다(Kong and Kim, 2016). 따라서 이 속성치는 분류군의 지표성을 더욱 뚜렷하게 보여주는 경향이 있다(Kong and Kim, 2016). 국내에서 복합출현도를 바탕으로 개발된 지수로는 Kong and Kim (2016)의 Benthic Macroinvertebrates Substrate Index (BMSI)와 Kong et al. (2018)의 Benthic Macroinvertebrates Index (BMI), Kong and Yeo (2023)의 Benthic Macroinvertebrates Genus Index (BMGI)가 있다.

각 분류군의 상대출현빈도(R_i)는 환경요인의 각 급구간(i)에서 해당 분류군이 출현한 표본단위수(n_i)를 해당 급구간의 총 표본단위수(N_i)로 나눈 값이다(식 1).

$$R_i = \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

급구간 i 에서 분류군의 평균출현밀도(\bar{A}_i)는 환경요인의 해당 급구간 내 각 표본단위(j)에서 나타난 분류군의 개체밀도(A_{ij})의 합을 해당 급구간의 총 표본단위수(N_i)로 나눈 값이다(식 2). 평균출현밀도 산정 시 해당 분류군이 출현하지 않은 표본단위의 출현밀도는 0으로 반영된다.

$$\bar{A}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} A_{ij}}{N_i} \tag{2}$$

복합출현도(C_i)는 상대출현빈도에 평균출현밀도를 곱한 값이다(식 3).

$$C_i = R_i \bar{A}_i \tag{3}$$

수질에 따른 분류군의 출현도를 연속적으로 해석하기 위해서는 일차적으로 복합출현도를 이산적인 확률질량함수(probability mass function, PMF)로 변환하고 이차적으로 연속적인 확률

밀도함수(probability density function, PDF)로 변환하는 과정이 필요하다. 따라서 급구간별 복합출현도와 급구간의 범위값(Δx_i)을 곱하고 이를 합한 값으로 해당 급구간의 복합출현도를 나눈 값을 확률질량함수 값으로 정하였다(식 4).

$$PMF_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^k C_i \Delta x_i} \tag{4}$$

식 4에 따라 급구간 m 까지의 누적질량함수(cummulative mass function)는 식 5와 같다. 식 5에서 전체 급구간까지($m=k$)의 누적질량함수 값은 1이 된다.

$$CMF_m = \sum_{i=1}^m (PMF_i \Delta x_i) = \frac{\sum_{i=1}^m C_i \Delta x_i}{\sum_{i=1}^k C_i \Delta x_i} \tag{5}$$

2.3.2 확률분포모형 선정

본 연구에서 적용한 확률분포모형은 Kong and Kang (2023)의 연구에서 적용된 바와 같이 역치값을 포함한 2인자 지수분포(Exponential distribution), 2인자 절단분포[정규분포(Normal distribution), 로지스틱분포(Logistic distribution), 굽벨분포(Gumbel distribution)], 역치값을 포함한 3인자 분포 [대수정규분포(Lognormal distribution), 베이블분포(Weibull distribution), 감마분포(Gamma distribution)], 역치값을 포함한 4인자 베타분포(Beta distribution)로 8개 유형이었으며, 이 중 4개의 모형(지수분포, 대수정규분포, 베이블분포, 감마분포)에 대해서는 부적편포(negatively skewed distribution)의 해석을 위한 역분포 모형(reversed distribution type)이 추가되었다(Table 1).

수질에 대한 생물의 분포는 요인의 범위가 $0 \sim \infty$ 또는 $0 \sim a$ 인 조건에서 더미분포를 가진 유형(Fig. 1a)과 역치값을 가지고 $a \sim \infty$ 또는 $a \sim b$ 의 분포를 갖는 유형(Fig. 1b)으로 구분할 수 있다.

Fig. 1a의 유형을 제외하고는 확률변수의 정의역에서 일반적으로 알려진 PDF와 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF) 및 통계량 함수를 적용할 수 있으나, 더미(dummy) 구간을 가진 Fig. 1a의 유형에 대해서는 확률변수의 정의역이 0 이상인 조건에 부합되도록 PDF와 CDF를 변형하고 통계량 함수를 유도하였다(Table 1).

2.3.3 확률분포의 모수 추정

Kong and Kang (2023)의 방법과 같이 CMF와 CDF의 표준화 평균 제곱근 오차(normalized root mean squared error, NRMSE) (식 6)가 최소가 되게 하는 확률분포의 모수를 Microsoft Excel 프로그램의 해 찾기 기능을 이용하여 도출하였다.

$$NRMSE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (CMF_i - CDF_i)^2}}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k CMF_i} \times 100 \tag{6}$$

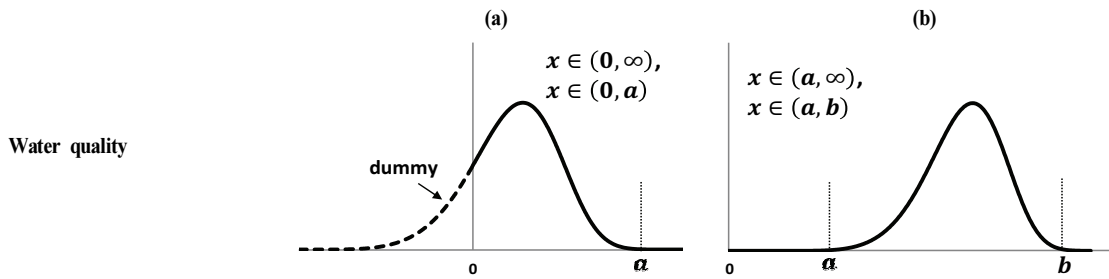


Fig. 1. Distribution type of aquatic organisms according to environmental factors; (a) with dummy, (b) shifted.

Table 1. Probability density function (PDF), cumulative distribution function (CDF), mode, mean, and variance according to the environmental variables (x)

		Type 1.1.1 $x \in (0, \infty), a > 0$	Type 1.1.2 $x \in (-a, \infty), a \leq 0$
Exponential distribution (Type 1.1)	CDF	$1 - \frac{e^{-\lambda(x+a)}}{1-\alpha}, \alpha = 1 - e^{-\lambda a}$	$1 - e^{-\lambda(x+a)}$
	PDF	$\frac{\lambda e^{-\lambda(x+a)}}{1-\alpha}$	$\lambda e^{-\lambda(x+a)}$
	Mode	0	-a
	Mean	1/λ	1/λ - a
	Variance	1/λ ²	1/λ ²
		Type 1.2.1 $x \in (0, a), a > 0$	Type 1.2.2 $x \in (-\infty, a)$
Reversed exponential distribution (Type 1.2)	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} [e^{-\lambda(a-x)} - \alpha], \alpha = e^{-\lambda a}$	$e^{-\lambda(a-x)}$
	PDF	$\frac{\lambda}{1-\alpha} e^{-\lambda(a-x)}$	$\lambda e^{-\lambda(a-x)}$
	Mode	a	a
	Mean	$a/(1-\alpha) - 1/\lambda$	$a - 1/\lambda$
	Variance	$1/\lambda^2 - \alpha a^2 / (1-\alpha)^2$	1/λ ²
		Type 2.1 $x \in (0, \infty)$	Type 2.2 $x \in (-\infty, \infty)$
Normal distribution (Type 2)	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \alpha \right]$ $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right)$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right)$
	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$
	Mode	μ	μ
	Mean	$\mu + \xi, \xi = \frac{\sigma e^{-(\mu/\sigma)^2/2}}{(1-\alpha)\sqrt{2\pi}}$	μ
	Variance	$\sigma^2 - \xi(\mu + \xi)$	σ ²
		Type 3.1.1 $x \in (0, \infty), a > 0$	Type 3.1.2 $x \in (-a, \infty), a \leq 0$
Lognormal distribution (Type 3.1)	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln(x+a)-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right] - \alpha \right\}$ $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln a - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right]$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln(x+a)-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right]$
	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln(x+a)-\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x-a)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x-a)-\mu}{\sigma} \right]^2}$

Lognormal distribution (Type 3.1)	Mode	$e^{\mu - \sigma^2} - a$	$e^{\mu - \sigma^2} - a$
	Mean	$(\tau_2/\tau_1)e^{\mu + \sigma^2/2} - a$ $\tau_1 = \text{erfc}(\beta), \beta = (\ln a - \mu)/(\sqrt{2}\sigma)$ $\tau_2 = \text{erfc}(\beta - \sigma/\sqrt{2})$	$e^{\mu + \sigma^2/2} - a$
	Variance	$e^{2\mu + \sigma^2}[(\tau_3/\tau_1)e^{\sigma^2} - (\tau_2/\tau_1)^2]$ $\tau_3 = \text{erfc}(\beta - \sqrt{2}\sigma)$	$(e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$
Reversed lognormal distribution (Type 3.2)	Type 3.2.1 $x \in (0, a), a > 0$		Type 3.2.2 $x \in (-\infty, a)$
	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left\{ \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\frac{\ln(a-x) - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right] - \alpha \right\}$ $\alpha = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\frac{\ln a - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right]$	$1 - \frac{1}{2} \text{erfc} \left[-\frac{\ln(a-x) - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right]$
	PDF	$\frac{1}{(1-\alpha)\sqrt{2\pi}\sigma(a-x)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a-x) - \mu}{\sigma} \right]^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(a-x)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a-x) - \mu}{\sigma} \right]^2}$
Reversed lognormal distribution (Type 3.2)	Mode	$a - e^{\mu - \sigma^2}$	$a - e^{\mu - \sigma^2}$
	Mean	$a - (\tau_2/\tau_1)e^{\mu + \sigma^2/2}$ $\tau_1 = \text{erfc}(\beta), \beta = (\mu - \ln a)/(\sqrt{2}\sigma)$ $\tau_2 = \text{erfc}(\beta + \sigma/\sqrt{2})$	$a - e^{\mu + \sigma^2/2}$
	Variance	$e^{2\mu + \sigma^2}[(\tau_3/\tau_1)e^{\sigma^2} - (\tau_2/\tau_1)^2]$ $\tau_3 = \text{erfc}(\beta + \sqrt{2}\sigma)$	$(e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$
Logistic distribution (Type 4)	Type 4.1 $x \in (0, \infty)$		Type 4.2 $x \in (-\infty, \infty)$
	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left[\frac{1}{1 + e^{-(x-\mu)/s}} - \alpha \right]$ $\alpha = \frac{1}{1 + e^{\mu/s}}$	$\frac{1}{1 + e^{-(x-\mu)/s}}$
	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{e^{-(x-\mu)/s}}{s [1 + e^{-(x-\mu)/s}]^2}$	$\frac{e^{-(x-\mu)/s}}{s [1 + e^{-(x-\mu)/s}]^2}$
	Mode	μ	μ
	Mean	$\frac{\mu + s\xi}{\alpha - 1} - \frac{\mu}{s}$ $\xi = \frac{\ln \alpha}{\alpha - 1} - \frac{\mu}{s}$	μ
Variance	$s^2 \left(\frac{\pi^2/3 - \tau}{1-\alpha} - \xi^2 \right), \tau = \int_0^\alpha \ln^2 \frac{t}{1-t} dt$	$s^2 \pi^2/3$	
Weibull distribution (Type 5.1)	Type 5.1.1 $x \in (0, \infty), a > 0$		Type 5.1.2 $x \in (-a, \infty), a \leq 0$
	CDF	$1 - \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^k}, \alpha = e^{-\left(\frac{a}{\lambda}\right)^k}$	$1 - e^{-\left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^k}$
	PDF	$\frac{1}{\alpha} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^k}$	$\frac{k}{\lambda} \left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x+a}{\lambda}\right)^k}$
	Mode	$\lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} - a$	$\lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} - a$
	Mean	$\xi_1 = \Gamma[1+1/k, (a/\lambda)^k] \lambda \frac{\xi_1}{\alpha} - a$ Γ : upper incomplete gamma function	$\lambda \Gamma(1+1/k) - a$
Variance	$\left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)^2 (\alpha \xi_2 - \xi_1^2)$ $\xi_2 = \Gamma[1+2/k, (a/\lambda)^k]$	$\lambda^2 \{ \Gamma(1+2/k) - [\Gamma(1+1/k)]^2 \}$	
	Type 5.2.1 $x \in (0, a), a > 0$		Type 5.2.2 $x \in (-\infty, a)$
	CDF	$\frac{e^{-[(a-x)/\lambda]^k} - \alpha}{1-\alpha}, \alpha = e^{-(a/\lambda)^k}$	$e^{-[(a-x)/\lambda]^k}$

Reversed Weibull distribution (Type 5.2)	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{a-x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{a-x}{\lambda}\right)^k}$	$\frac{k}{\lambda} \left(\frac{a-x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{a-x}{\lambda}\right)^k}$
	Mode	$a - \lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k}$	$a - \lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k}$
	Mean	$a - \lambda \frac{\xi_1}{1-\alpha}$ $\xi_1 = \Gamma(1+1/k) - \Gamma[1+1/k, (a/\lambda)^k]$ Γ : upper incomplete gamma function	$a - \lambda \Gamma(1+1/k)$
	Variance	$\left(\frac{\lambda}{1-\alpha}\right)^2 [(1-\alpha)\xi_2 - \xi_1^2]$ $\xi_2 = \Gamma(1+2/k) - \Gamma[1+2/k, (a/\lambda)^k]$	$\lambda^2 \{ \Gamma(1+2/k) - [\Gamma(1+1/k)]^2 \}$
		Type 6.1.1 $x \in (0, \infty), a > 0$	Type 6.1.2 $x \in (-a, \infty), a \leq 0$
Gamma distribution (Type 6.1)	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left[\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x+a}{\theta}\right) - \alpha \right]$ $\alpha = \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{a}{\theta}\right)$	$\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x+a}{\theta}\right)$
	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} (x+a)^{k-1} e^{-\frac{x+a}{\theta}}$	$\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} (x+a)^{k-1} e^{-\frac{x+a}{\theta}}$
	Mode	$(k-1)\theta - a$	$(k-1)\theta - a$
	Mean	$\theta\xi_1 - a$ $\xi_1 = \Gamma(k+1, a/\theta) / \Gamma(k, a/\theta)$ Γ : upper incomplete gamma function	$k\theta - a$
	Variance	$\theta^2(\xi_2 - \xi_1^2)$ $\xi_2 = \Gamma(k+2, a/\theta) / \Gamma(k, a/\theta)$	$k\theta^2$
Reversed gamma distribution (Type 6.2)	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left[1 - \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{a-x}{\theta}\right) - \alpha \right]$ $\alpha = 1 - \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{a}{\theta}\right)$	$1 - \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{a-x}{\theta}\right)$
	PDF	$\frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} (a-x)^{k-1} e^{-\frac{a-x}{\theta}}$	$\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} (a-x)^{k-1} e^{-\frac{a-x}{\theta}}$
	Mode	$(1-k)\theta + a$	$(1-k)\theta + a$
	Mean	$a - \theta\xi_1$ $\xi_1 = \frac{\Gamma(k+1) - \Gamma(k+1, a/\theta)}{\Gamma(k) - \Gamma(k, a/\theta)}$ Γ : upper incomplete gamma function	$a - k\theta$
	Variance	$\theta^2(\xi_2 - \xi_1^2)$ $\xi_2 = \frac{\Gamma(k+2) - \Gamma(k+2, a/\theta)}{\Gamma(k) - \Gamma(k, a/\theta)}$	$k\theta^2$
Beta distribution (Type 7)		Type 7.1 $x \in (0, b), a > 0$	Type 7.2 $x \in (-a, b)$
	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} \left[\frac{B\left(\frac{x+a}{b+a}; \lambda, k\right)}{B(\lambda, k)} - \alpha \right]$ $\alpha = \frac{B\left(\frac{a}{b+a}; \lambda, k\right)}{B(\lambda, k)}$	$\frac{B\left(\frac{x+a}{b+a}; \lambda, k\right)}{B(\lambda, k)}$
	PDF	$\frac{\left(\frac{x+a}{a+b}\right)^{\lambda-1} \left(1 - \frac{x+a}{a+b}\right)^{k-1}}{(1-\alpha)(b+a)B(\lambda, k)}$	$\frac{\left(\frac{x+a}{b+a}\right)^{\lambda-1} \left(1 - \frac{x+a}{b+a}\right)^{k-1}}{(b+a)B(\lambda, k)}$

Beta distribution (Type 7)	Mode	$\frac{(b+a)(\lambda-1)}{\lambda+k-2} - a, \lambda, k > 1$ $b \text{ at } \lambda, k < 1$ $0 \text{ at } \lambda \leq 1, k > 1$ $b \text{ at } \lambda > 1, k \leq 1$	$\frac{(b+a)(\lambda-1)}{\lambda+k-2} - a, \lambda, k > 1$ $-a, b \text{ at } \lambda, k < 1$ $-a \text{ at } \lambda \leq 1, k > 1$ $b \text{ at } \lambda > 1, k \leq 1$
	Mean	$\tau_1 = {}_2F_1[k, 1-\lambda; k+1; b/(a+b)]$ $\frac{(b\lambda - ak)\tau_2 + ak[a/(a+b)]^\lambda}{\lambda\tau_1} = \xi_0$ $\tau_2 = {}_2F_1[k, -\lambda; k+1; b/(a+b)]$ ${}_2F_1: \text{hypergeometric function}$	$\frac{(b+a)\lambda}{\lambda+k} - a$
	Variance	$\frac{\xi_1\tau_2 - \xi_2}{\lambda(\lambda+k+1)\tau_1} - \xi_0^2$ $\xi_1 = a^2k(k+1) - 2ab\lambda k + b^2\lambda(\lambda+1)$ $\xi_2 = ak(ak+a-b\lambda)\left(\frac{a}{a+b}\right)^\lambda$	$\frac{(b+a)^2\lambda k}{(\lambda+k+1)(\lambda+k)^2}$
Gumbel distribution (Type 8)		Type 8.1 $x \in (0, \infty)$	Type 8.2 $x \in (-\infty, \infty)$
	CDF	$\frac{1}{1-\alpha} [e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}} - \alpha]$ $\alpha = e^{-e^{\mu/\beta}}$	$e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}}$
	PDF	$\frac{1}{(1-\alpha)\beta} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta} + e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}\right)}$	$\frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta} + e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}\right)}$
	Mode	μ	μ
	Mean	$\frac{\mu + \beta\xi}{1-\alpha}$ $\xi = \frac{\gamma - \text{Ei}(-e^{\mu/\beta}) + \alpha\mu/\beta}{1-\alpha}$ <p>γ: Euler's constant Ei: Exponential integral</p>	$\mu + \beta\gamma$ <p>γ: Euler's constant</p>
Variance	$\frac{\beta^2}{1-\alpha} \left[\frac{\pi^2}{6} + \gamma^2 - \tau \right] - \beta^2\xi^2$ $\tau = \int_{-\infty}^{-\mu/\beta} z^2 e^{-(z+e^{-z})} dz$	$\beta^2\pi^2/6$	

2.3.4 서식처 적합도 지수 도출

화학적 수질에 대한 생물의 서식처 적합도 지수(habitat suitability index, HSI)는 Kong and Kim (2017)이 미국의 Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG, 1986)의 기준을 따라 적용한 방법을 준용하여 최빈값을 중심으로 확률분포의 50%, 75%, 90%, 95% 범위에 대하여 각각 1.0, 0.5, 0.1, 0.05의 값을 부과하였다.

3. Results and Discussion

3.1 BOD₅

BOD₅에 대한 각 확률분포모형의 CDF와 각 분류군의 출현도에서 산정된 CMF 간의 NRMSE는 Table 2와 같다. 동양하루살이-사할린하루살이 군, 무늬하루살이, 가는무늬하루살이 모두 최빈값을 중심으로 정적편포하였다. 동양하루살이-사할린하루살이는 대수정규분포의 적합도가 가장 높았으며 무늬하루살이는 균분포의 적합도가 가장 높았으며 가는무늬하루살이는 역베이블분포의 적합도가 가장 높았다. 또한 이 세 분류군 모두 지수분포모형 및 역지수분포모형을 제외한 다른 모형들의 적합도 역시 전반적으로 높았다.

Fig. 2는 각 분류군의 BOD₅에 대한 PMF와 이에 대하여 최적의 적합도를 보이는 확률분포모형의 PDF 및 CDF를 도시한 것이다. BOD₅에 대한 각 분류군의 출현도는 분류군별로 차이가 컸으며 BOD₅의 범위에 따라 표본단위의 수도 차이가 컸기 때문에 각 급구간의 범위는 분류군의 출현특성에 따라 달리 설정하였다.

동양하루살이-사할린하루살이 군은 최빈값인 0.9 mg/L 이상의 높은 농도의 BOD₅의 구간에서도 높은 출현도를 보였으며 무늬하루살이는 약 7.4 mg/L까지 출현하였지만 최빈값인 0.5 mg/L 이상에서 지속적으로 출현도가 감소하였고 가는무늬하루살이는 최빈값인 0.0 mg/L 이상에서 지속적으로 출현도가 뚜렷하게 감소하였다(Fig. 2, Table 3).

HSI에 따른 각 분류군의 BOD₅ 범위는 Table 4와 같다. HSI 값이 1.0에 해당하는 범위를 최적 적응범위라 본다면 Fig. 3의 50% 범위의 하한값과 상한값은 생물의 BOD₅에 대한 최적 적응범위의 경계값이라 볼 수 있다. 이에 따라 BOD₅에 대한 동양하루살이-사할린하루살이 군의 최적 적응 범위는 0.4~1.9 mg/L, 무늬하루살이는 0.4~0.7 mg/L, 가는무늬하루살이는 0.0~0.4 mg/L로 분석되었다(Table 4). 무늬하루살이와 동양하루살이-사할린하루살이는 BOD₅에 대한

Table 2. Normalized root mean squared error (%) between cumulative mass function based on the composite frequency of each taxon according to biochemical oxygen demand (BOD₅) gradient and cumulative distribution function of each model

Model	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>		<i>E. strigata</i>		<i>E. separigata</i>	
	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)
Exponential	1.1.1	9.3	1.1.1	9.9	1.1.1	2.4
R-exponential	1.2.1	50.8	1.2.1	67.8	1.2.1	36.9
Normal	2.1	9.2	2.1	0.8	2.1	2.0
Lognormal	3.1.1	6.3	3.1.1	0.1	3.1.1	2.0
R-lognormal	3.2.1	9.2	3.2.1	0.9	3.2.1	2.0
Logistic	4.1	8.7	4.1	0.4	4.1	2.0
Weibull	5.1.1	8.5	5.1.1	0.9	5.1.1	2.0
R-Weibull	5.2.1	8.5	5.2.1	0.3	5.2.1	2.0
Gamma	6.1.1	8.1	6.1.1	0.4	6.1.1	2.0
R-gamma	6.2.1	9.3	6.2.1	0.9	6.2.1	2.0
Beta	7.1	8.1	7.1	0.4	7.1	2.0
Gumbel	8.1	8.4	8.1	0.1	8.1	2.0

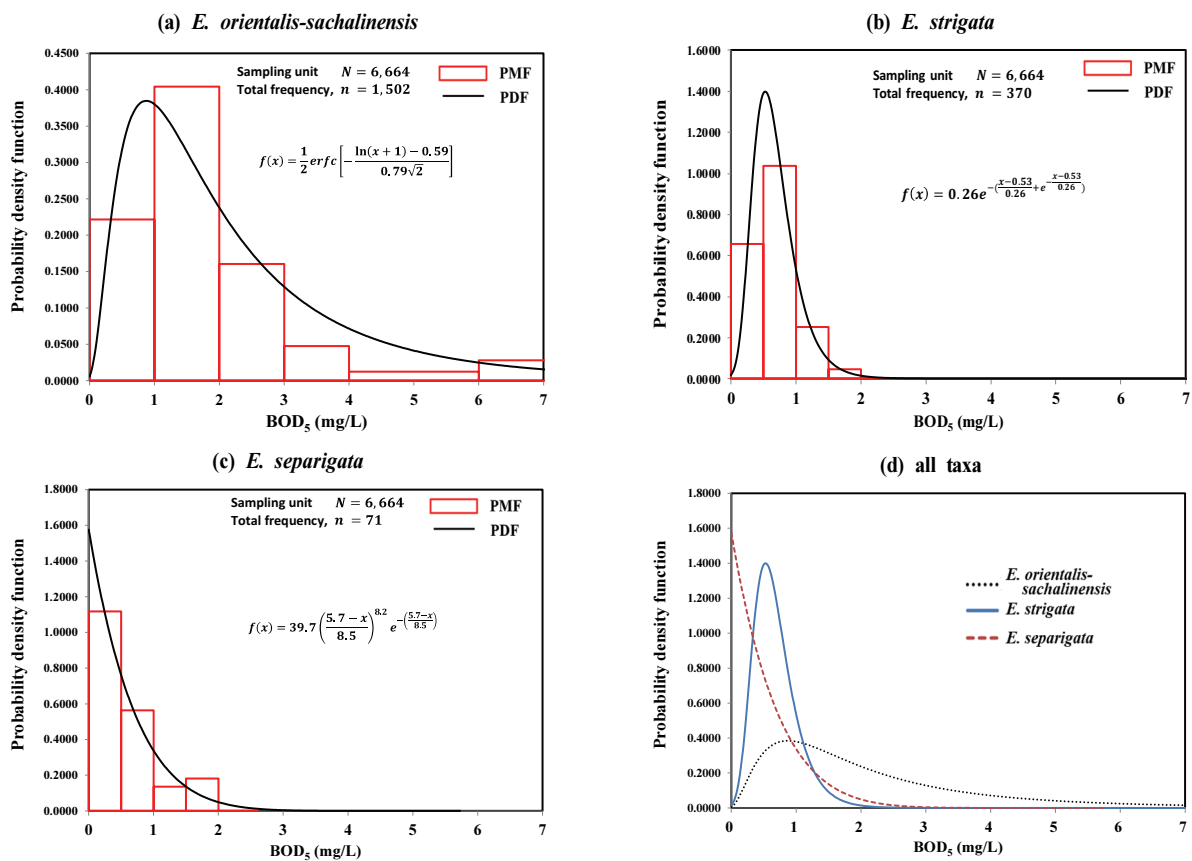


Fig. 2. Probability mass function based on the composite frequency of each taxon according to BOD₅ gradient, probability density function, and probability distribution function of the best-fit model; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

최적 적응범위에서 지위가 일부 중복되며 가는무늬하루살이는 다른 하루살이과 분류군과 지위가 뚜렷하게 구별됨을 확인할 수 있었다.

서식처적합도(Table 4)와 증양값과 표준편차(Table 3)를 고려할 때 동양하루살이-사할린하루살이 군은 낮은 농도부터 높은 농도의 BOD₅까지 넓게 적응된 광부수성(eurysaprobic)

Table 3. The best-fit probability distribution models and model statistics for biochemical oxygen demand (BOD₅) gradient of each taxon

	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	<i>E. strigata</i>	<i>E. separigata</i>
Model	Lognormal	Gumbel	R-Weibull
Type	3.1.1	8.1	5.2.1
Mean (mg/L)	2.3	0.7	0.6
Median (mg/L)	1.7	0.6	0.4
Mode (mg/L)	0.9	0.5	0.0
Standard deviation (mg/L)	2.3	0.3	0.5
Coefficient of variance (%)	96	49	90

Table 4. Habitat suitability range of *Ephemera* species for biochemical oxygen demand (BOD₅).

Taxa	Range of habitat suitability (mg/L)			
	50%	75%	90%	95%
<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	0.4 ~ 1.9	0.2 ~ 3.0	0.1 ~ 4.9	0.0 ~ 6.5
<i>E. strigata</i>	0.4 ~ 0.7	0.3 ~ 0.9	0.2 ~ 1.2	0.1 ~ 1.4
<i>E. separigata</i>	0.0 ~ 0.4	0.0 ~ 0.8	0.0 ~ 1.3	0.0 ~ 1.6

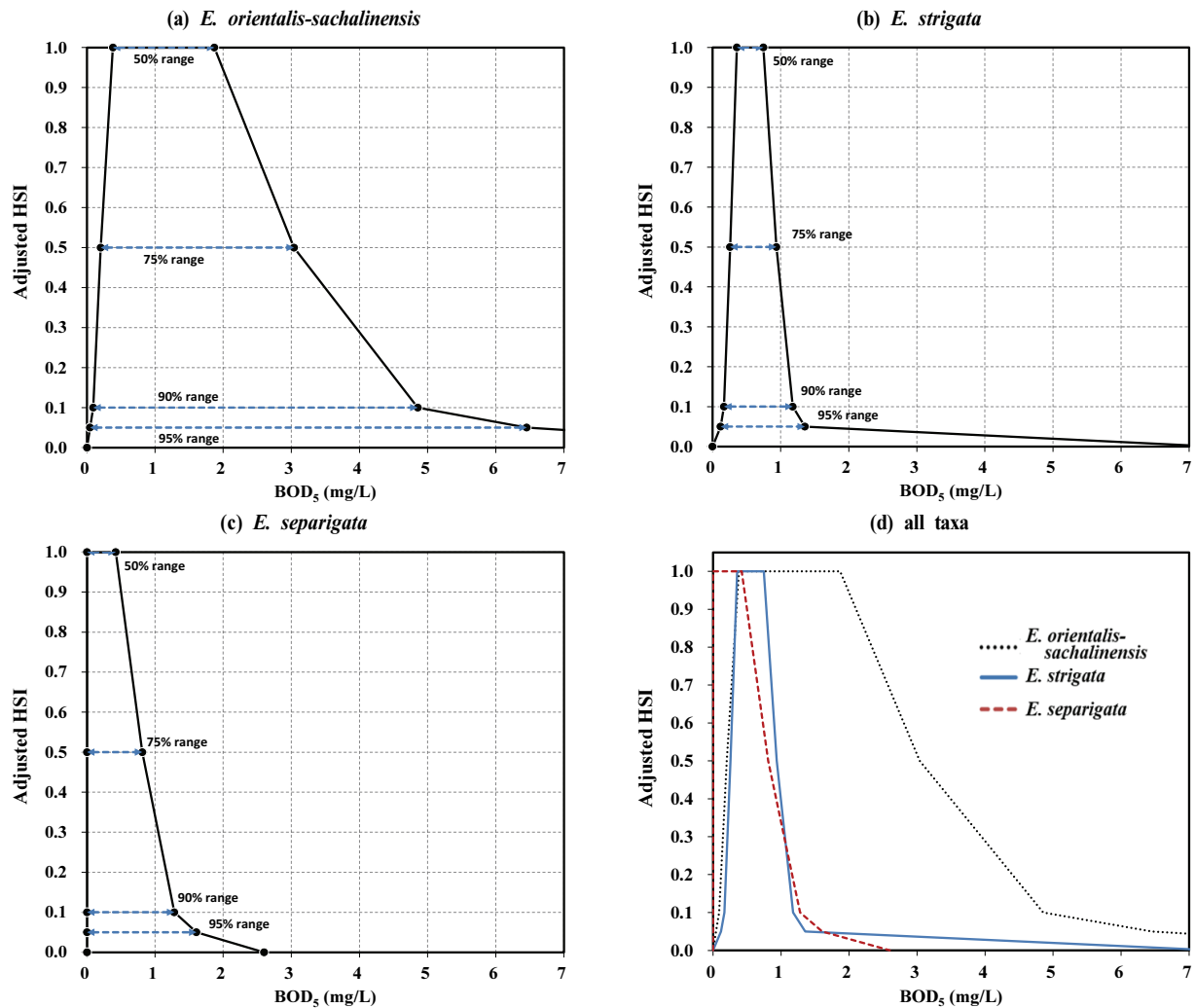


Fig. 3. Habitat suitability index of *Ephemera* species for biochemical oxygen demand (BOD₅) gradient; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

이었으며, 무늬하루살이는 낮은 농도의 BOD₅에 적응한 빈부수성(oligosaprobic), 가는무늬하루살이는 낮은 농도의 BOD₅에 좁게 적응된 협빈부수성(stenooligosaprobic)으로 평가된다.

동양하루살이의 출현에 대하여 Park and Park (1999)은 동양하루살이가 BOD₅의 농도가 4.3 mg/L에서도 출현한다고 보고하였다. Kong et al. (2018)은 BOD₅의 농도를 변수로 한 생물종의 출현 특성을 확률적으로 분석하였다. 이때 산출된 오락치는 동양하루살이는 0.8, 사할린하루살이는 0.7, 무늬하루살이는 0.1, 가는무늬하루살이는 0.1로 제시되었다. 이는 다른 부수성 생물의 오락치에 비해 낮은 정도로 비교적 좋은 수질의 환경에 적응되어 있음을 확인 할 수 있다. 또한 환경부의 환경정책기본법 시행령 제 2조 별표1 환경기준(개정 2022.12.06.)의 하천수 수질환경기준에서 BOD₅의 농도가 1.0 mg/L 이하인 하천을 수질이 매우 좋다고 평가하였으며 5.0 mg/L 이하까지는 보통의 하천이라고 평가하였다. 이를 통해 동양하루살이-사할린하루살이 군이 다른 하루살이속의 집단보다 수질이 비교적 좋지 않은 환경에 대하여까지 적응되어 있음을 확인할 수 있다.

3.2 T-P

T-P에 대한 CDF와 CMF 간의 NRMSE는 Table 5와 같다. 최빈값을 중심으로 정적편포를 보이는 동양하루살이-사할린하루살이 군의 분포에는 굽벨분포모형의 적합도가 가장 높았으며 무늬하루살이 및 가는무늬하루살이의 분포는 최빈값을 중심으로 약한 정적편포를 보이며 모두 대수정규분포모형의 적합도가 가장 높았고 역대수정규분포모형(reversed exponential distribution model)의 적합도를 제외한 다른 모형들의 적합도 또한 전반적으로 높았다.

Fig. 4는 각 분류군의 유속에 대한 PMF와 이에 대하여 최적의 적합도를 보이는 확률분포모형의 PDF 및 CDF를 도시한 것이다. T-P에 대한 각 분류군의 출현도는 분류군별로 차이가 컸으며 T-P의 범위에 따라 표본단위의 수도 차이가 컸

기 때문에 각 급구간의 범위는 분류군의 출현특성에 따라 달리 설정하였다.

동양하루살이-사할린하루살이 군은 낮은 농도의 T-P부터 높은 농도의 T-P 까지 전체적으로 출현하였으며 출현도는 최빈값인 0.052 mg/L 이상으로 갈수록 뚜렷하게 감소하였다. 무늬하루살이의 출현도는 최빈값인 0.012 mg/L 이상에서 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다. 가는무늬하루살이의 출현도는 최빈값인 0.000 mg/L 이상에서 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4, Table 6).

T-P에 대한 하루살이속의 HSI 값을 산출한 결과, 동양하루살이-사할린하루살이 군의 최적 적응범위는 0.024~0.086 mg/L, 무늬하루살이는 0.007~0.018 mg/L, 가는무늬하루살이는 0.000~0.015 mg/L로 분석되었다(Fig. 5, Table 7). 동양하루살이-사할린하루살이 군의 T-P에 대한 최적 적응범위와 무늬하루살이 및 가는무늬하루살이의 최적 적응범위는 뚜렷하게 구분되었다. 무늬하루살이와 가는무늬하루살이의 최적 적응범위에서는 지위가 중복되지만 가는무늬하루살이가 적응범위가 낮은 농도의 T-P에서 더 크게 나타났다.

서식처 적합도(Table 7) 및 중앙값과 표준편차(Table 6)를 고려할 때 동양하루살이-사할린하루살이 군은 높은 농도의 T-P까지 좁게 적응되어 있었으며, 무늬하루살이는 동양하루살이-사할린하루살이 군의 적응농도보다 낮은 농도의 T-P에서 좁게 적응되어 있었고 가는무늬하루살이는 낮은 농도의 T-P에서 넓게 적응되어 있는 것으로 보였다.

환경정책기본법에서 T-P의 농도가 0.020 mg/L 이하인 하천을 수질이 매우 좋다고 평가하였으며 0.200 mg/L 이하까지는 보통의 하천이라고 평가하였다. 이에 따르면 동양하루살이-사할린하루살이 군이 다른 하루살이속의 집단보다 수질이 비교적 좋지 않은 환경까지 적응하고 있음을 확인할 수 있었다. 반면에 무늬하루살이와 가는무늬하루살이의 최적 적응범위가 0.020 mg/L 이하였으므로 수질이 매우 좋은 하천에 적응하고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5. Normalized root mean squared error (%) between cumulative mass function, based on the composite frequency of each taxon, according to total phosphorus (T-P) gradient and cumulative distribution function of each model

Model	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>		<i>E. strigata</i>		<i>E. separigata</i>	
	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)
Exponential	1.1.1	13.5	1.1.1	8.5	1.1.1	7.1
R-exponential	1.2.1	71.0	1.2.1	64.0	1.2.1	57.4
Normal	2.1	9.7	2.1	4.1	2.1	7.2
Lognormal	3.1.1	9.6	3.1.1	3.0	3.1.1	6.6
R-lognormal	3.2.1	9.7	3.2.1	4.1	3.2.1	7.3
Logistic	4.1	8.7	4.1	3.6	4.1	7.1
Weibull	5.1.1	10.4	5.1.1	4.3	5.1.1	7.1
R-Weibull	5.2.1	13.4	5.2.1	3.3	5.2.1	7.7
Gamma	6.1.1	9.6	6.1.1	3.6	6.1.1	7.1
R-gamma	6.2.1	9.8	6.2.1	7.8	6.2.1	7.8
Beta	7.1	9.7	7.1	8.1	7.1	8.0
Gumbel	8.1	7.2	8.1	3.1	8.1	7.1

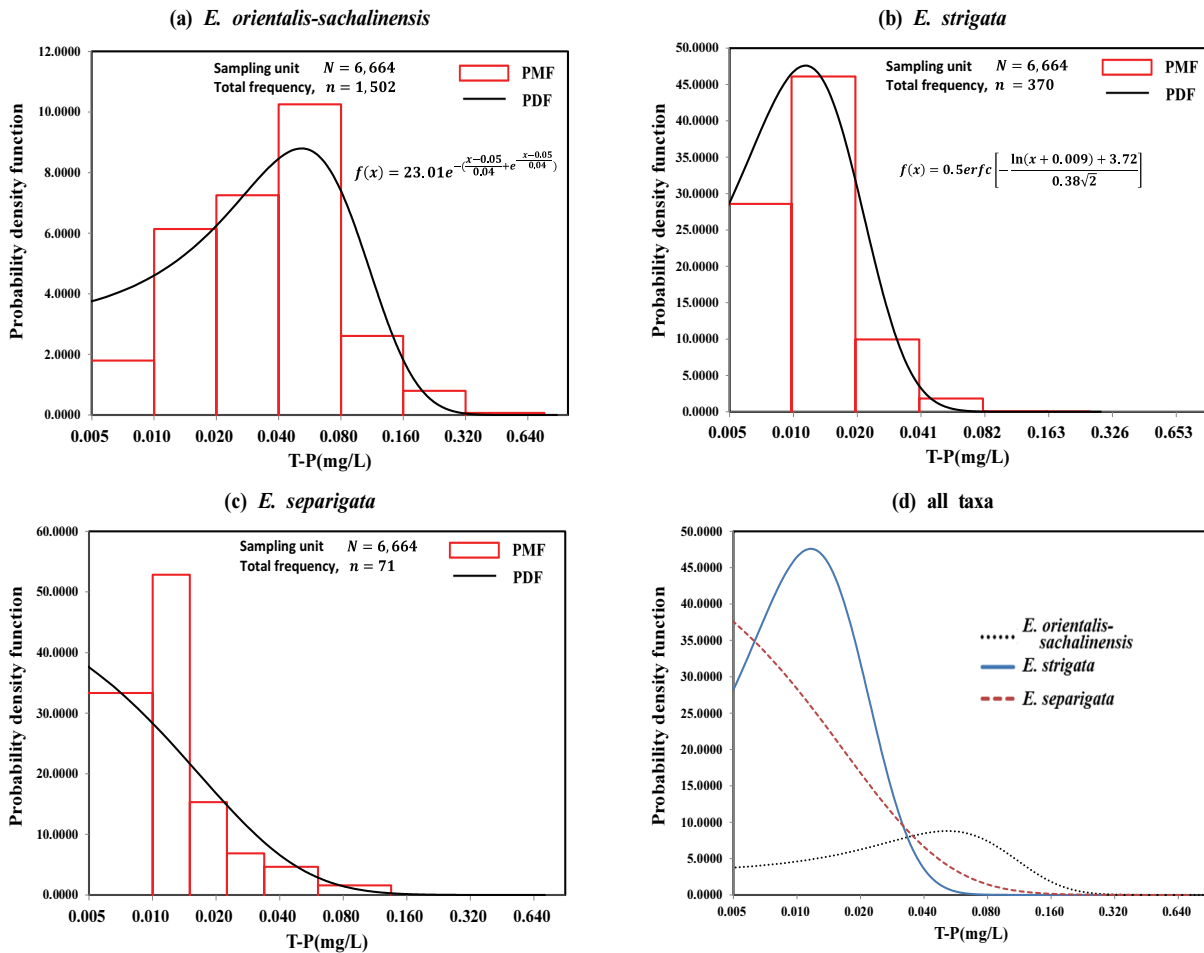


Fig. 4. Probability mass function based on the composite frequency of each taxon according to total phosphorus (T-P) gradient, probability density function, and probability distribution function of the best-fit model; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

Table 6. The best-fit probability distribution models and model statistics for the total phosphorus (T-P) gradient of each taxon

	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	<i>E. strigata</i>	<i>E. separigata</i>
Model	Gumbel	Lognormal	Lognormal
Type	8.1	8.1	8.1
Mean (mg/L)	0.080	0.017	0.025
Median (mg/L)	0.070	0.015	0.015
Mode (mg/L)	0.052	0.012	0.000
Standard deviation (mg/L)	0.054	0.010	0.031
Coefficient of variance (%)	67	60	127

Table 7. Habitat suitability range of *Ephemera* species for total phosphorus (T-P)

Taxa	Range of habitat suitability (cm/s)			
	50%	75%	90%	95%
<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	0.024 ~ 0.086	0.009 ~ 0.115	0.001 ~ 0.153	0.001 ~ 0.185
<i>E. strigata</i>	0.007 ~ 0.018	0.004 ~ 0.024	0.000 ~ 0.030	0.000 ~ 0.037
<i>E. separigata</i>	0.000 ~ 0.015	0.000 ~ 0.032	0.000 ~ 0.059	0.000 ~ 0.084

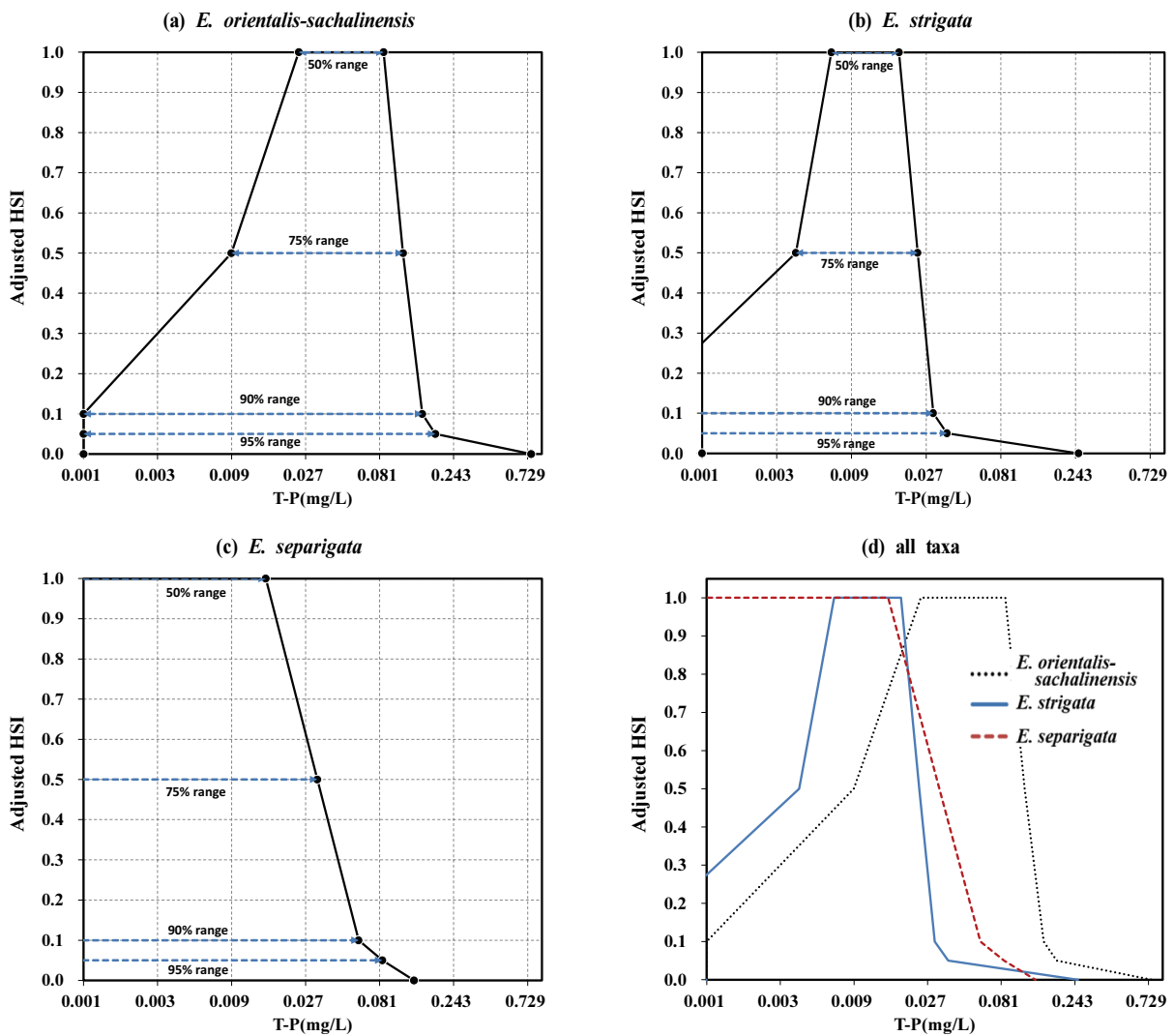


Fig. 5. Habitat suitability index of *Ephemera* species for total phosphorus (T-P) gradient; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

3.3 TSS

TSS에 대한 CDF와 CMF 간의 NRMSE는 Table 8과 같다. 최빈값을 중심으로 높은 정적편포를 보이는 동양하루살이-사할린하루살이 군, 무늬하루살이 및 가는무늬하루살이의 분포는 모두 대수정규분포모형의 적합도가 가장 높았으며 역대수정규분포모형(reversed exponential distribution model)을 제외한 다른 모형들의 적합도 역시 전반적으로 높았다.

Fig. 6은 각 분류군별로 TSS에 대한 PMF와 이에 대하여 최적의 적합도를 보이는 확률분포모형의 PDF 및 CDF를 도시한 것이다. TSS에 대한 각 분류군의 출현도는 분류군별로 차이가 컸으며 TSS의 범위에 따라 표본단위의 수도 차이가 컸기 때문에 각 급구간의 범위는 분류군의 출현특성에 따라 달리 설정하였다.

동양하루살이-사할린하루살이 군은 최빈값인 8.0 mg/L을 전후하여 넓은 구간에서 출현하였으며 142.2 mg/L의 높은 농도까지 출현하였다. 무늬하루살이는 최빈값인 0.0 mg/L 이상의 구간으로 갈수록 출현도가 감소하였다. 가는무늬하루살

이는 최빈값인 1.5 mg/L 이상의 구간에서 출현도가 감소하였다(Fig. 6, Table 9).

TSS에 대한 하루살이속의 HSI 값을 산출한 결과, 동양하루살이-사할린하루살이 군의 최적 적응범위는 2.5~22.4, 무늬하루살이는 0.0~1.7, 가는무늬하루살이는 0.5~3.1로 동양하루살이-사할린하루살이 군과 무늬하루살이 및 가는무늬하루살이 분류군은 서로 뚜렷하게 지위가 구분됨을 확인할 수 있었다. 무늬하루살이와 가는무늬하루살이는 지위가 일부 중복됨을 확인할 수 있었다(Fig. 7, Table 10).

서식처적합도(Table 10)와 중앙값과 표준편차(Table 9)를 고려할 때 동양하루살이-사할린하루살이 군은 비교적 낮은 농도의 TSS와 높은 농도의 TSS까지 넓게 적응하였으며, 무늬하루살이는 낮은 농도의 TSS에 비교적 좁게 적응하였고, 가는무늬하루살이는 낮은 농도의 TSS에 무늬하루살이에 비해 넓게 적응된 것으로 평가된다.

환경정책기본법에서 TSS의 농도가 25.0 mg/L 이하인 하천을 수질이 보통 이상이라고 평가하였다. 이는 하루살이속이

Table 8. Normalized root mean squared error (%) between cumulative mass function, based on the composite frequency of each taxon, according to total suspended solids (TSS) gradient and cumulative distribution function of each model.

Model	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>		<i>E. strigata</i>		<i>E. separigata</i>	
	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)	Type	NRMSE (%)
Exponential	1.1.1	8.5	1.1.1	2.7	1.1.1	9.4
R-exponential	1.2.1	48.8	1.2.1	49.1	1.2.1	29.5
Normal	2.1	10.0	2.1	2.1	2.1	9.1
Lognormal	3.1.1	4.1	3.1.1	2.0	3.1.1	4.5
R-lognormal	3.2.1	10.1	3.2.1	2.2	3.2.1	5.4
Logistic	4.1	8.2	4.1	2.0	4.1	9.4
Weibull	5.1.1	7.7	5.1.1	2.1	5.1.1	5.5
R-Weibull	5.2.1	8.2	5.2.1	2.6	5.2.1	5.0
Gamma	6.1.1	7.1	6.1.1	2.0	6.1.1	4.6
R-gamma	6.2.1	10.1	6.2.1	2.2	6.2.1	5.4
Beta	7.1	8.5	7.1	2.0	7.1	4.6
Gumbel	8.1	8.1	8.1	2.0	8.1	9.4

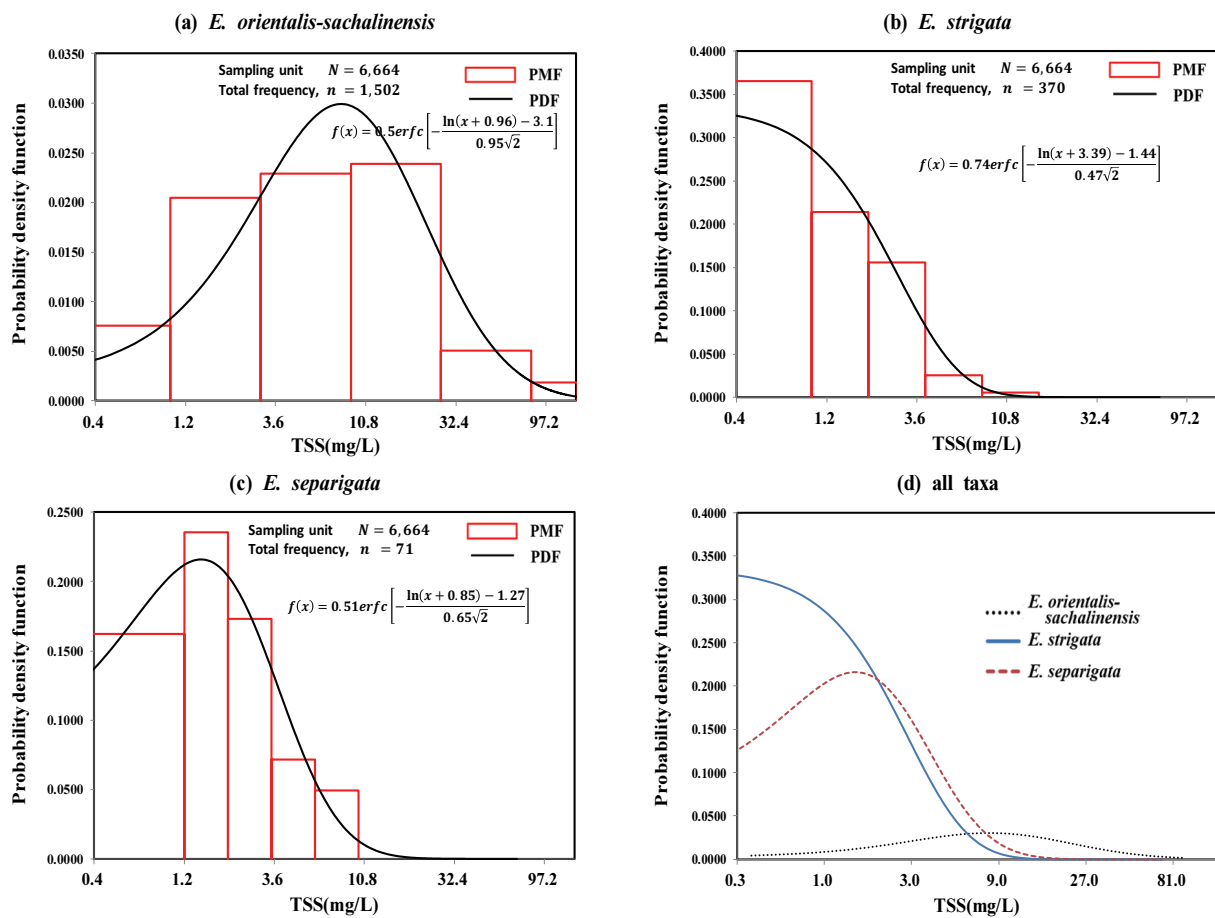


Fig. 6. Probability mass function based on the composite frequency of each taxon according to total suspended solids (TSS) gradient, probability density function, and probability distribution function of the best-fit model; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

Table 9. The best-fit probability distribution models and model statistics for the total suspended solids (TSS) gradient of each taxon

	<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	<i>E. strigata</i>	<i>E. separigata</i>
Model	Lognormal	Lognormal	Lognormal
Type	3.1.1	3.1.1	3.1.1
Mean	33.6	2.3	3.6
Median	21.1	1.7	2.7
Mode	8.0	0.0	1.5
Standard deviation	41.7	2.1	3.2
Coefficient of variance (%)	124	93	89

Table 10. Habitat suitability range for *Ephemera* species for total suspended solids (TSS)

Taxa	Range of habitat suitability (phi value)			
	50%	75%	90%	95%
<i>E. orientalis-sachalinensis</i>	2.5~22.4	0.9~41.4	0.1~73.5	0.0~104.0
<i>E. strigata</i>	0.0~1.7	0.0~3.2	0.0~5.0	0.0~6.4
<i>E. separigata</i>	0.5~3.1	0.1~4.8	0.0~7.4	0.0~9.6

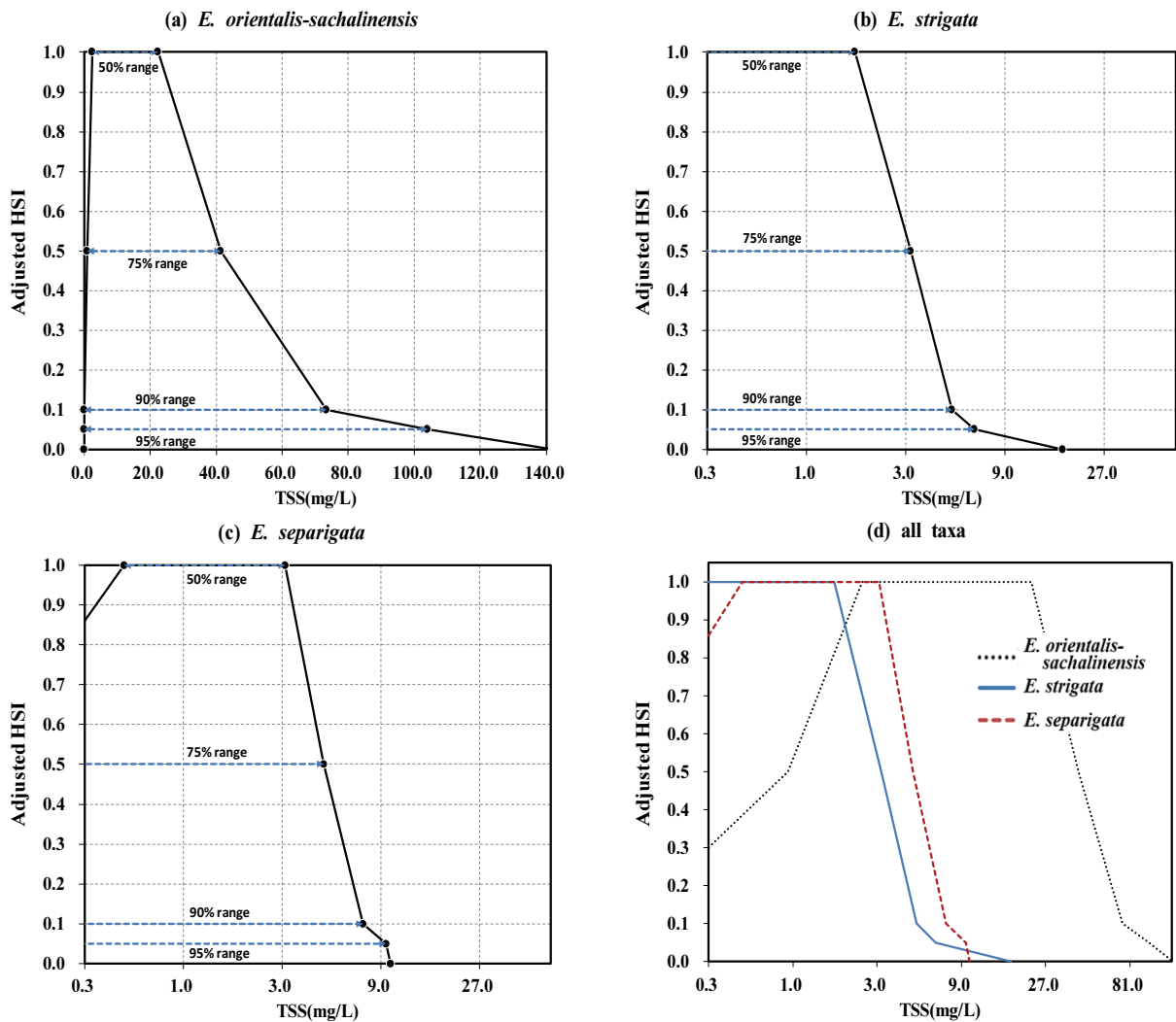


Fig. 7. Habitat suitability index *Ephemera* species for total suspended solids (TSS) gradient; (a) *Ephemera orientalis-sachalinensis*, (b) *Ephemera strigata*, (c) *Ephemera separigata*, (d) all taxa.

모두 보통 이상의 수질의 하천에서 적응하고 있으며 동양하루살이-사할린하루살이 군은 다른 두 종보다 비교적 수질이 안 좋은 환경에서도 서식할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. Conclusion

본 연구는 2010년부터 2021년까지 6,664개 지점의 23,957개 표본단위 조사된 자료를 바탕으로 확률분포모형을 적용하여 하루살이속(*Ephemera*) 4종의 화학적 환경요인(BOD₅, T-P, TSS)에 대한 적합도를 밝힌 것이다.

각 화학적 수질요인에 대한 최빈값을 중심으로 각 분류군의 출현도가 강한 정적편포를 보이는 경우에는 베타분포모형, 감마분포모형 및 베이블분포모형, 대수정규분포모형의 적합도가 높았으며, 약한 정적편포를 보이는 경우에는 굽벨분포와 로지스틱분포모형, 베타분포모형의 적합도가 높았고, 약한 부적편포를 보이는 경우에는 베이블분포모형과 역대수정규분포모형, 베타분포모형의 적합도가 높았다. 전반적으로 대수정규분포모형의 적합도가 높았는데 이는 모형이 가지고 있는 유연성에 따른 것으로 보인다.

동양하루살이-사할린하루살이 군은 높은 농도의 BOD₅에 넓게 적응한 광부수성(eurysaprobic)이며 높은 T-P 및 TSS에 좁게 적응된 것으로 평가되었다. 이에 반하여 무늬하루살이는 낮은 농도의 BOD₅, T-P 및 TSS에 적응한 빈부수성(oligosaprobic)으로 평가된다. 가는무늬하루살이는 무늬하루살이와 서식 지위가 일부 중복되지만 낮은 농도의 BOD₅에 좁게 적응된 협빈부수성(stenooligosaprobic)이며 낮은 농도의 T-P와 TSS에 무늬하루살이에 비해 넓게 적응된 것으로 평가된다.

BOD₅, T-P, TSS는 수질의 유기오염을 대표하는 주요 항목으로 이들이 하루살이속 분류군의 서식처에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해서 하루살이속 분류군에 대한 각각의 화학적 요인의 적합도를 평가한 것으로 각 요인의 교호작용에 대한 평가는 본 연구에서 수행되지 않았다. 따라서 각 환경요인이 각 분류군의 분포에 미치는 영향도에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

하루살이속 분류군들의 출현도는 본 연구의 결과에서 수질요인의 농도에 따라 뚜렷한 차이를 보였는데, 이러한 출현도의 차이가 수질 자체에 따른 것인지 선행 연구된 고도와 유속, 수온 등의 물리적인 요인과의 복합적인 작용에 의한 것인지에 대하여는 추가적으로 검토가 필요하다. 또한 본 연구에서는 복합적으로 다른 동양하루살이와 사할린하루살이의 각각의 화학적 수질요인에 대한 분포구계를 밝히는 것도 후속과제이다.

References

Bae, Y. J. (1995). *Ephemera separigata*, a new species of Ephemeridae (Insecta: Ephemeroptera) from Korea, *Korean Journal of Systematic Zoology*, 11, 159-166.

Dufrène, M. and Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach, *Ecological Monographs*, 67, 345-366.

Hwang, J. M, Lee, S. J., and Bae, Y. J. (2003). Two co-inhabiting burrowing mayflies, *Ephemera orientalis* and *E. sachalinensis*, in Korean streams (Ephemeroptera: Ephemeridae), *Korean Journal of Limnology*, 36, 427-433.

Hwang, J. M. (2007). *Systematics and Ecology of the Mayfly Genus Ephemera (Ephemeroptera: Ephemeridae)*, Department of Biology, Ph.D. thesis, The Graduate School of Seoul Women's University, 1-174.

Hwang, J. M., Yoon, T. J., Suh, K. I., and Bae, Y. J. (2013). Molecular phylogeny evidence of altitudinal distribution and habitat adaptation in Korean Ephemera species (Ephemeroptera: Ephemeridae), *Entomological Research*, 43, 40-46.

Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG). (1986). Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology: Biological report, *Instream Flow Information Paper*, 21, National Ecology Center.

Kim, H. G., Yoon, C., and Cheong, S. W. (2018). A community characteristic on benthic macroinvertebrates and correlation of physicochemical water quality factors in stream of Gaya mountain, *Journal of Wetlands Research*, 20(4), 322-329. [Korean Literature]

Kim, Y. J. and Kong, D. (2018). Estimation on physical habitat suitability of benthic macroinvertebrates in the Hwayang stream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(1), 10-25. [Korean Literature]

Kong D. and Kim A. R. (2017). Estimation on the physical habitat suitability of benthic macroinvertebrates in the Gapyeong stream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(3), 311-325. [Korean Literature]

Kong, D. and Kang, B. (2023). Estimation on altitudinal spectrum of suitability for four species of the Mayfly Genus *Ephemera* (Ephemeroptera: Ephemeridae) using probability distribution models, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 39(4), 302-315. [Korean Literature]

Kong, D. and Kim, A. R. (2015). Analysis on the relationship between number of species and survey area of benthic macroinvertebrates using weibull distribution function, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(2), 142-150. [Korean Literature]

Kong, D. and Kim, J. Y. (2016). Development of benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) for bioassessment of stream physical habitat, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 1-14. [Korean Literature]

Kong, D. and Song, J. (2023). Estimation on physical microhabitat suitability for species of the Mayfly Genus *Ephemera* (Ephemeroptera: Ephemeridae) using probability distribution models, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 39(5), 396-412. [Korean Literature]

Kong, D. and Yeo, M. (2023). Development and application of benthic macroinvertebrate genus index for biological

- assessment on Korean stream environment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 39(4), 369-287. [Korean Literature]
- Kong, D., Kim, J. Y., Son, S. H., Oh, M. W., Choi, A. R., and Byeon, M. S. (2013). Development and application of Korean thermality index (KTI) for biological assessment on climate change, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(1), 114-126. [Korean Literature]
- Kong, D., Son, S. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Jeon, T. S., Lee, J. E., Kim, J. H., Kim, J. S., Park, J. H., Kwak, I. S., Ham, S. A., Jun, Y. C., Park, Y. S., Lee, J. K., Lee, S. W., Park, C. H., Moon, J. S., Kim, J. Y., Park, H. K., Park, S. J., and Kim, P. J. (2018). Development of benthic macroinvertebrates index (BMI) for biological assessment on stream environment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 183-201. [Korean Literature]
- Lee S. J., Hwang, J. M., and Bae, Y. J. (2008). Life history of a lowland burrowing mayfly, *Ephemera orientalis* (Ephemeroptera: Ephemeridae), in a Korean stream, *Hydrobiologia*, 596, 279-288.
- Lee, S. J., Bae, Y. J., Yoon, I. B., and Watanabe, N. C. (1999). Comparisons of temperature-related life histories in two ephemerid mayflies (*Ephemera separigata* and *E. strigata*: Ephemeridae, Ephemeroptera, Insecta) from a mountain stream in Korea, *Korean Journal of Limnology*, 32, 253-260.
- Lee, S. J., Yoon, I. B., and Bae, Y. J. (1995). Altitudinal distribution of *Ephemera strigata* Eaton and *E. orientalis* McLachlan (Ephemeroptera : Ephemeridae), *Korean Journal of Entomology*, 25(3), 201-208. [Korean Literature]
- Minister of Environment (ME). (2022). *Enforcement decree of the framework act on environmental policy, Article 12-2*, Publication of Environmental Standards.
- Park, S. J., Park, S. Y., Kim, S. J., and Bae, Y. J. (1997). Altitude distribution of Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera in a mountain stream of Chiaksan, *Entomological Research Bulletin*, 23, 37-42.
- Park, Y. K. and Park, H. C. (1999). Biological water quality using the benthic macroinvertebrates in Miryang river, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 8(1), 7-18. [Korean Literature]
- Tshernova, O. A. (1973). Palearctic species of the genus *Ephemera* L. (Ephemeroptera, Ephemeridae), *Entomologicheskoe Obozrenie*, 52, 223-233.
- Yoon, I. B., Kong, D., and Ryu, J. K. (1992). Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (I) saprobic valency and indicative value, *Korean Journal of Environmental Biology*, 10(1), 24-49. [Korean Literature]