시그모이드 함수를 이용한 파리 종에 대한 성장곡선모형의 비교

박지은¹ · 정수진¹ · 박상현²
신상언³ · 박성환³ · 문태영²
이재원¹

¹고려대학교 통계학과

²고신대학교 의생명과학과

³고려대학교 의과대학 법의학교실

Received: February 13, 2020

Revised: May 11, 2020

Accepted: May 22, 2020

Correspondence to

Jae Won Lee

Department of Statistics, Korea
University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu,
Seoul 02841, Korea

Tel: +82-2-3290-2237

Fax: +82-2-924-9895

E-mail: jael@korea.ac.kr

A Comparison of Growth Curve Models for Forensically Important Flies Using Sigmoid Functions

Ji Eun Park¹, Su Jin Jeong¹, Sang Hyun Park², Sang Eon Shin³, Seong Hwan Park³,
Tae-Young Moon², Jae Won Lee¹

¹Department of Statistics, Korea University, Seoul, Korea, ²Department of Biomedical Sciences,
Kosin University, Busan, Korea, ³Department of Legal Medicine, Korea University College of
Medicine, Seoul, Korea

To estimate postmortem interval, it is essential to obtain information regarding fly growth. Analyzing the relationship between growth period and body length using a sigmoid function is widely accepted in animal science. However, in forensic entomology, it is difficult to find studies related to growth period and body length. Therefore, we compared growth curve models for forensically important flies using sigmoid functions. we used the data from flour fly species (*Calliphora lata*, *Calliphora vicina*, *Chrysomya pinguis*, and *Lucilia illustris*) and fitted these against five sigmoid functions: quadratic-plateau model, logistic model, Gompertz model, von Bertalanffy model, and Brody model. Model evaluation criteria were, R^2 mean squared error (MSE), Akaike information criterion (AIC), and Bayesian information criterion (BIC). The von Bertalanffy model yielded the highest R^2 value and the lowest MSE, AIC, and BIC values for *C. lata*, whereas the logistic model was the best fit for the data from the other three species *C. vicina*, *Ch. pinguis*, and *L. illustris*.

Key Words: Sigmoid function; Forensic entomology; Growth curve;
Model comparison; Model evaluation

서 론

법의곤충학에서 최소사후경과시간(minimum postmortem intervals)을 추정하기 위해 시식성 곤충(necrophagous insect)의 정보가 사용된다. 이 때, 주로 사용되는 곤충의 정보는 주로 성장과 관련되어있다[1,2]. 파리 종의 성장은 같은 종이라도 온도, 습도 등 여러 외부적 요인에 따라 다르게 나타나며, 이는 사후경과시간을 추정하는 데에도 영향을 미친

다[3]. 따라서 여러 요인을 고려한 파리 종의 성장정보를 얻는 것은 매우 중요한 일이다[4].

국내에서 법의학 수사에서 자주 사용되는 파리과는 집파리과(Musidae), 검정파리과(Calliphoridae), 쉬파리과(Sarcophagidae) 등이 있는데, 이는 시체에 가장 먼저 무리를 이루기 때문에 빈번하게 발견된다[5]. 이 중에서도 검정파리과에 속하는 붉은뺨검정파리(*Calliphora vicina*), 큰검정뺨금파리(*Chrysomya pinguis*), 큰검정파리(*Calliphora*

lata) 등은 중요하다고 생각되는 파리 종이다[6,7]. 연두금파리(*Lucilia illustris*) 역시 검정파리과에 속하는 종으로 사체에서 쉽게 발견된다. 그러므로 법의학술을 비롯한 곤충학 등의 학문에서 중요하다고 생각되며 연두금파리에 대한 보다 깊은 연구가 진행되고 있다[8].

현재까지 시그모이드 함수(sigmoid function)를 이용해 시간에 따른 몸길이를 추정하기 위한 연구는 다양한 동식물에 대해 많이 이루어져 왔다[9]. 성장데이터를 적절한 모형에 적합시켜 성장을 예측하는 것은 동식물로부터 얻어 낼 수 있는 2차 부산물에 대한 최적화와 통제에 중요한 역할을 한다[10,11]. Beltran 등 (1992) [12]과 Silva 등(2011) [13]은 젖소의 성장을 추정하기 위해 브로디모형(Brody model)을 이용했고, Franco 등 (2011) [14]은 돼지의 성장을, *Goliomytis* 등(2006) [15]은 양의 성장곡선을 추정하고 Curi 등(1985) [16]는 토끼의 성장을 추정하기 위해 시그모이드 함수모형을 사용했다. 하지만 파리 종의 경우 시간에 따른 몸길이를 추정하기 위한 연구는 현재까지 국내에서는 없었으며 해외의 경우 역시 Lecheta와 Moura (2019) [17]의 연구가 유일하다. Lecheta와 Moura (2019) [17]은 *Sarconesia chlorogaster* (Diptera: Calliphoridae) 종의 성장모형을 추정하기 위해 4가지의 시그모이드 함수모형을 사용했다.

본 연구에서는 4가지 파리 종의 시간에 따른 몸길이를 추정하기 위해 총 5가지의 시그모이드 함수를 사용해 모형을 수립하고 그들의 성능을 비교해 각 파리 종별 적합한 성장모형이 무엇인지 제안해 보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험대상 및 방법

본 연구는 시간이 지남에 따라 파리 유충의 몸길이 변화를 통한 유충의 성장모형을 구축하고자 하였다. 성장모형을 적합할 파리 종은 서론에서 언급했던 사체에 가장 먼저 무리를 이루는 파리 종과 쉽게 발견되는 종, 많은 연구에서 법의학적으로 중요하다고 생각되는 종을 고려하였다. 그 결과 총 4종

의 파리 종을 선별했고 그 종은 각각 큰검정파리, 붉은뺨검정파리, 큰검정뺨금파리, 연두금파리이다. 성장모형 구축을 위해 사용된 자료는 각 파리 유충이 사육된 온도와 시간에 따른 몸길이 정보가 포함되었다. 파리 유충 사육 실험은 고신대학교 의생명과학과에서 진행하였으며 그 과정은 다음과 같다. 각 실험 단계에 대한 세부 설정은 Lecheta와 Moura (2019) [17]와 Kim 등(2007) [18] 등을 참고하였다.

돼지 허파 위에 산란된 알(egg)들은 미세붓을 이용하여 하나씩 분리되었고, 분리된 200개의 알들은 20개씩 10개의 사육 용기(높이 10 cm, 지름 8 cm의 원통형 플라스틱)에 넣었다. 사육 용기에 탈지면을 깐 신선한 돼지 허파(약 50 g)를 먹이로 제공했다. 이러한 사육용기는 항온항습기(4-Room Tempand Humid Chamber, TNC Bio, Busan, Korea)에 넣어 두었다[18]. 사육온도는 각각 큰검정파리의 경우 16°C, 21°C, 26°C, 31°C, 붉은뺨검정파리는 25°C, 30°C, 큰검정뺨금파리는 25°C, 26°C, 연두금파리는 21°C, 26°C, 31°C에서 사육되었다. 이때 12:12 (L:D, 시간) 광주기와 습도는 70%에서 실험하였다. 실험온도를 유지하기 위해 디지털온도계를 이용해서 실험온도 범위($\pm 1^\circ\text{C}$)로 유지하였다. 유충의 사육온도는 해당 종들을 야외에서 채집된 온도를 기준으로 사육을 진행하다보니 각 종들이 현장에서 출현하는 온도가 달라서 이에 따라 사육온도도 다르게 설정되었다. 유충의 샘플링(sampling)은 알이 부화한 것을 확인한 후 하루에 2회 10개의 사육 용기에서 랜덤으로 총 5개체를 선별해서 길이를 측정하였다. 각 성장단계에서 채집된 유충은 체장을 측정하기 위해 70–80°C의 뜨거운 물에 넣어 유충을 죽인 후 현미경(SZX2-TR30, Olympus, Tokyo, Japan)과 ToupView 3.7 프로그램(ToupView 3.7, ToupTek Photonics, Hangzhou, China)을 이용하여 구기부터 후기문까지의 길이를 측정하였다. 이 때의 끓는 물에 처리를 한 것은 유충의 체장을 측정할 때 최대 길이(maximal extension)를 유도하기 위함이다[17]. 체장의 길이를 측정한 후 표본을 추가 변형을 막기 위해 각 유충은 에탄올(80%)에 넣은 후 냉동(-20°C) 보관했다.

이렇게 사육된 파리 유충의 성장데이터는 Table 1과 같다. 총 4종의 파리가 사육되었으며 각각 큰검정파리(*C. lata*), 붉

Table 1. Basic information of collected flies (4 species)

	<i>Calliphora lata</i>	<i>Calliphora vicina</i>	<i>Chrysomya pinguis</i>	<i>Lucilia illustris</i>
No. of observations	343	453	145	111
Temperature (°C)	16, 21, 26, 31	25, 30	25, 26	21, 23, 26, 31
Humidity (%)	70	70	70	70
Growth time (hr) ^{a)}	0–380	0–469	0–195	0–108
Body length (mm) ^{a)}	1.10–29.32	0.75–22.65	1.82–16.93	1.00–16.30

^{a)}Growth time and body length are expressed by range.

은뺨검정파리(*C. vicina*), 큰검정뺨금파리(*Ch. pinguis*), 연두금파리(*L. illustris*)이며, 각 유충의 성장시간, 성장단계, 몸길이(mm)가 함께 수집되었다.

2. 통계모형 적합

시간의 흐름에 따른 파리 유충의 몸길이 변화를 적합시키기 위해 다음과 같이 5가지 통계모형을 사용하였다. 적합에 사용된 통계모형은 (1) 이차받침모형(Quadratic-plateau model), (2) 로지스틱모형(Logistic model), (3) 고펜퍼츠모형(Gompertz model), (4) 본 베르탈란피모형(von Bertalanffy model), (5) 브로디모형(Brody model)으로서, 이 모형들은 동식물의 성장을 설명하기 위해 빈번하게 사용되는 모형들이다[7].

이차받침모형은 독립변수의 특정 값 이전까지는 곡선 모양의 이차식을 갖지만 특정 값 이후에는 종속변수의 값이 일정해지는 특징을 지닌다. 이 모형은 농업에서 비료가 농작물의 성장에 미치는 영향을 설명하기 위해 처음 고안되었다[19]. S자 형태의 시그모이드 함수 중 대표적인 모형인 로지스틱모형은 인구 성장을 설명하기 위해 Verhulst (1838) [20]에 의해 고안된 모형으로 성장의 초기 단계에는 지수적(exponential)으로 증가하다가, 인구가 포화 상태에 접어들면 인구 성장이 선형적으로 둔화하고, 마지막 단계로 접어들면 성장을 멈추는 형태를 보인다[21]. 고펜퍼츠모형은 Gompertz (1825) [22]에 의해 처음 소개되었다. 이 모형은 생물학에서 자주 활용되며 주로 동식물의 성장을 설명하는데 사용된다[23]. 본 베르탈란피모형은 일반화 로지스틱 함수(generalized logistic function)의 특수한 경우로 시간과 관련된 변수를 이용해 성장모형을 모형화하는 데 사용된다. 주로 동물의 나이에 따른 몸길이를 적합하는 데 사용된다[24,25]. 브로디모형은 초기에 어류의 몸길이-시간의 관계를 나타내기 위해 사용되었던 모형으로 지수함수(exponential function)에서부터 변형된 모형이다[26].

각 모형을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

(1) 이차받침모형(Quadratic-plateau model),

$$y = \begin{cases} a+bx+cx^2, & x \leq \frac{-0.5b}{c} \\ a + \frac{-b^2}{4c}, & x > \frac{-0.5b}{c} \end{cases}$$

이 때, $\frac{-0.5b}{c}$ 가 종속변수 값이 일정해지는 독립변수의 값이고 이때의 종속변수의 값을 받침값(plateau point)이라고 한다.

(2) 로지스틱모형(Logistic model), $y=a(1+be^{-cx})^{-1}$

(3) 고펜퍼츠모형(Gompertz model), $y=ae^{-be^{-cx}}$

(4) 본 베르탈란피모형(von Bertalanffy model),
 $y=a(1-be^{-cx})^3$

(5) 브로디모형(Brody model), $y=a(1-be^{-cx})$

위 모형들은 3가지 종류로 분류할 수 있는데, 이차받침모형은 특정 설명변수 값 이상에서는 고정된 종속변수의 값을 갖는 모형; 브로디모형은 성장단계 후반에서 종속변수의 값이 감소하는 모형; 로지스틱모형, 고펜퍼츠모형, 본 베르탈란피모형은 S자 모형을 갖고 고정된 변곡점(inflexion)이 있는 모형으로 나뉜다[8].

3. 모형 평가 기준

적합에 사용된 통계모형 중 어떤 모형이 데이터에 가장 잘 적합되는지 평가하기 위해 R^2 와 평균 제곱 오차(mean squared error, MSE), Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC)을 평가 기준으로 고려했다. R^2 는 모형의 설명력을 나타내는 통계량으로 반응변수의 변동량 중에서 적합된 모형으로 설명이 가능한 비율을 나타내며 0과 1 사이의 값을 가진다. 1에 가까운 값을 가질수록 더 높은 설명력을 가진다[27]. MSE는 관측치와 추정치 차이의 제곱 평균을 나타내는 통계량으로 MSE값이 작을수록 더 좋은 모형이라고 판단할 수 있다. AIC와 BIC는 우도(likelihood)에 독립변수의 수에 대한 손실(penalty)을 반영하는 방법이다. 이때, 손실 가중치를 계산하는 방법에 따라 AIC와 BIC로 나뉜다. AIC의 경우 모형과 데이터의 확률 분포 사이의 쿨백-라이블러(Kullback-Leibler)값을 가장 크게 하고자 하는 시도에서 나왔으며, $AIC=2k-2\ln(\hat{L})$ 로 구한다. 이때, k 는 추정하고자 하는 모수의 수이고 $\hat{L}$ 은 우도 함수(likelihood function)의 최댓값이다[28,29]. BIC는 데이터가 지수족(exponential family)이라는 가정하에 데이터에서 모형의 우도를 측정하기 위해 유도되었다. BIC는 $BIC=-2\log\hat{L}+k\log(n)$ 으로 구하며 이때 k 는 추정하고자 하는 모수의 수이고, n 은 관측치 수, $\hat{L}$ 은 우도 함수의 최댓값이다[30]. 두 통계량 모두 작은 값을 가질수록 해당 모형이 더 적합하다고 해석할 수 있다.

4. 분석프로그램

해당 분석은 R3.5.3 (<https://cran.r-project.org>) 통계프로그래밍으로 분석하였으며, 분석에 사용한 R packages는 ‘easynls’이고, 그래프를 그리기 위해 사용한 packages는 ‘ggplot2’이다.

결 과

1. 각 파리 종별 성장단계와 사육온도에 따른 몸길이

성장단계별로 수집된 각 파리 종별 데이터를 통계모형에 적합하기 전, 성장단계와 사육온도에 따른 유충의 몸길이에 대한 기초분석을 하였다. 우선, 모든 파리 종에서 볼 수 있는 특징으로는 알 단계에서 후섭식기(post-feeding)단계에 도달할 때 몸길이는 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 후섭식기에서 번데기(pupa) 단계로 넘어가는 과정에서 25°C에서 사육된 큰검정뽕금파리를 제외하고는 평균 몸길이가 감소한 것을 알 수 있다. 연두금파리의 경우 3령 이후 단계의 자료가 수집되지 않아 확인할 수 없었다. 후섭식기 단계와 번데기 단계의 몸길이 차이가 가장 큰 파리 종은 붉은뽕검정파리였으며 25°C의 경우 후섭식기 단계에서의 몸길이는 15.51 mm였으나 번데기 단계에서의 몸길이는 8.66 mm였다. 26°C의 경우 후섭식기 단계에서의 몸길이는 10.95 mm였으나 번데기 단계에서의 몸길이는 7.53 mm였다(Table 2).

2. 통계모형 적합 결과

각 파리 종별 데이터를 여러 통계모형에 적합한 결과는 다음과 같다. 먼저, 각 종별 통계모형 적합식을 표로 정리하였다(Table 3). 분석대상이었던 4가지 파리 종에서 각각 5종류의 통계모형을 적합한 결과 모든 적합식의 계수는 유의수준 5% 하에서 유의한 것으로 나타났다($P < 0.0001$).

각 모형식에 적합을 한 후 모형 평가를 통해 가장 잘 적

합된 모형을 선택하기 위해 위에서도 언급했던 R^2 , MSE, AIC, BIC 통계량을 비교해 보았다(Table 4). R^2 값을 살펴보면 붉은뽕검정파리를 제외한 나머지 3종에서의 R^2 은 0.8 이상인 것으로 나타나 적합이 잘 되는 것을 알 수 있다. 붉은뽕검정파리의 경우 모든 모형에서 R^2 값이 약 0.5로 전반적인 모형 적합이 잘 이루어지지 않은 것을 알 수 있다. MSE도 11 이상으로 다른 종들에 비해 그 값이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 각 종별로 자세히 살펴보면, 큰검정파리의 경우 본 베르탈란피모형이 가장 적합도가 높았고($R^2=0.8552$; MSE, 8.4222; AIC, 1,712.28; BIC, 1,727.63) 고펜르츠모형이 그 뒤를 이었다($R^2=0.8549$; MSE, 8.4405; AIC, 1,713.02; BIC, 1,728.38). 큰검정파리를 제외한 나머지 세 종(붉은뽕검정파리, 큰검정뽕금파리, 연두금파리)의 경우 가장 적합이 좋았던 모형은 공통적으로 로지스틱 모형이었다. 통계량은 각각 붉은뽕검정파리의 경우 $R^2=0.5598$, MSE 11.0331, AIC 2,334.02, BIC 2,340.40이었으며, 큰검정뽕금파리의 경우 $R^2=0.8950$, MSE 2.5054, AIC 552.67, BIC 564.57, 연두금파리의 경우 $R^2=0.9697$, MSE 0.8453, AIC 304.35, BIC 315.18로 적합한 모든 종에 대한 모든 모형에서 가장 적합값이 컸다. 큰검정파리와 마찬가지로 나머지 세가지 종에서도 두 번째로 적합이 잘 된 모형은 고펜르츠모형이었으며 붉은뽕검정파리의 경우 $R^2=0.5550$, MSE 11.2867, AIC 2,344.11, BIC 2,360.49, 큰검정뽕금파리의 경우 $R^2=0.8763$, MSE 2.9518, AIC 576.44, BIC 588.35, 연두금파리의 경우 $R^2=0.9587$, MSE 1.1593, AIC 338.80, BIC 349.64의 통계량을 나타내었다(Table 4).

하지만, 붉은뽕검정파리의 경우 위에서 언급한 것과 같이

Table 2. Mean body length (mm) of species at each growth stage and rearing temperature

Species	Temperature (°C)	Developmental stage					
		Egg	1st instar	2nd instar	3rd instar	Post feeding	Pupa
A	16	1.41±0.03	3.52±0.77	7.63±1.58	16.93±3.51	21.84±2.37	19.01±0.00
	21	1.40±0.01	3.53±0.50	8.81±2.11	17.55±1.60	21.42±0.54	18.18±1.31
	26	1.36±0.10	4.30±0.48	7.41±1.73	17.07±2.53	20.11±2.05	—
	31	1.40±0.00	3.76±0.87	7.54±2.80	13.61±1.62	20.67±2.31	—
B	25	1.29±0.18	2.53±0.88	6.46±2.70	15.11±2.15	15.51±3.36	8.66±0.92
	30	1.31±0.04	2.81±1.01	5.47±0.29	9.82±2.25	10.95±1.81	7.53±1.89
C	25	1.84±0.02	4.80±1.40	5.89±0.68	12.60±2.79	14.94±0.93	15.23±0.78
	26	1.86±0.02	4.83±1.43	5.91±0.52	13.24±2.84	15.25±0.73	15.08±0.88
D	21	1.17±0.04	2.23±0.14	—	13.13±0.95	—	—
	23	1.15±0.13	2.14±0.19	—	13.28±0.88	—	—
	26	1.17±0.04	1.97±0.53	6.96±0.76	13.13±0.95	14.00±1.13	—
	31	1.18±0.05	2.21±0.12	7.01±0.67	13.86±1.27	—	—

Values are presented as mean±standard deviation.

A, *Calliphora lata*; B, *Calliphora vicina*; C, *Chrysomya pinguis*; D, *Lucilia illustris*.

Table 3. Estimated growth curve with fitted value of each model

Species	Model	Estimated growth curve
<i>Calliphora lata</i>	Quadratic-plateau	$y=0.5667+0.2104x-0.0005x^2$
	Logistic	$y=21.0179(1+10.9736e^{-0.0363x})^{-1}$
	Gompertz	$y=21.5295e^{(-3.3351e^{0.0242x})}$
	Von Bertalanffy	$y=21.8011(1-0.7739e^{-0.0245x})^3$
	Brody	$y=23.3753(1-1.0526e^{-0.0112x})$
<i>Calliphora vicina</i>	Quadratic-plateau	$y=-0.4862+0.3003x-0.0018x^2$
	Logistic	$y=12.2390(1+37.3937e^{-0.1115x})^{-1}$
	Gompertz	$y=12.2234e^{(11.1692e^{0.0890x})}$
	Von Bertalanffy	$y=12.2327(1-1.2340e^{-0.0632x})^3$
	Brody	$y=12.1534(1-1.0625e^{-0.0368x})$
<i>Chrysomya pinguis</i>	Quadratic-plateau	$y=1.1063+0.1851x-0.0006x^2$
	Logistic	$y=15.5915(1+7.7826e^{-0.0427x})^{-1}$
	Gompertz	$y=16.1394e^{(-2.4064e^{-0.0266x})}$
	Von Bertalanffy	$y=16.5052(1-0.5668e^{-0.0217x})^3$
	Brody	$y=17.9909(1-0.9348e^{-0.0124x})$
<i>Lucilia illustris</i>	Quadratic-plateau	$y=-0.3295+0.4401x-0.0035x^2$
	Logistic	$y=13.6316(1+43.1807e^{-0.1641x})^{-1}$
	Gompertz	$y=13.7128e^{(-8.4905e^{-0.1140x})}$
	Von Bertalanffy	$y=13.9036(1-1.2010e^{-0.0828x})^3$
	Brody	$y=14.9883(1-1.0124e^{-0.0342x})$

Table 4. Model evaluation statistics of 5 statistical models for 4 species

Species	Model	R ²	MSE	AIC	BIC
<i>Calliphora lata</i>	Quadratic-plateau	0.8462	8.9479	1,733.05	1,748.40
	Logistic	0.8490	8.7926	1,727.05	1,742.40
	Gompertz	0.8549	8.4405	1,713.02	1,728.38
	Von Bertalanffy	0.8552	8.4222	1,712.28	1,727.63
	Brody	0.8410	9.2498	1,744.43	1,759.79
<i>Calliphora vicina</i>	Quadratic-plateau	0.5350	11.6543	2,358.34	2,374.72
	Logistic	0.5598	11.0331	2,334.02	2,340.40
	Gompertz	0.5550	11.2867	2,344.11	2,360.49
	Von Bertalanffy	0.5388	11.5580	2,354.65	2,371.04
	Brody	0.4802	13.0278	2,407.80	2,424.19
<i>Chrysomya pinguis</i>	Quadratic-plateau	0.8702	3.0979	583.45	595.36
	Logistic	0.8950	2.5054	552.67	564.57
	Gompertz	0.8763	2.9518	576.44	588.35
	Von Bertalanffy	0.8679	3.1509	585.91	597.81
	Brody	0.8485	9.5924	605.82	617.73
<i>Lucilia illustris</i>	Quadratic-plateau	0.9138	2.4063	420.47	431.31
	Logistic	0.9697	0.8453	304.35	315.18
	Gompertz	0.9587	1.1593	338.80	349.64
	Von Bertalanffy	0.9491	1.4197	361.91	372.74
	Brody	0.8742	3.5123	462.45	473.29

MSE, mean squared error; AIC, Akaike information criterion; BIC, Bayesian information criterion.

모형 평가 기준으로 사용한 통계량 값들이 다른 종에 비해 현저히 떨어지므로 그 이유를 알아보기 위해, 각 모형에 적합한 값들을 원자료를 이용해 그린 산점도(scatter plot)위에 그려 보았다(Fig. 1). Fig. 1의 그래프는 각 파리 종의 시간에 따른 몸길이(mm)를 산점도로 그린 뒤, 5개의 모형의 적합 값을 선으로 표현한 것이다. 산점도를 살펴보면 붉은뺨검정파리의 산점도가 다른 종과는 확실히 다른 것을 확인할 수 있다. 붉은뺨검정파리를 제외한 나머지 종들의 산점도는 시간이 지남에 따라 몸길이가 점점 증가하다가 일정 시간이 지난 후에는 몸길이의 값이 일정하거나 비슷한 분포를 보이는 것을 알 수 있는데, 붉은뺨검정파리의 경우 몸길이가 가장 길어지는 시점 이후에 그 값이 급격하게 감소한 뒤 일정해지는 양상을 보

인다. 붉은뺨검정파리의 산점도에 5개의 모형을 적합한 선을 보면, 적합에 사용된 모형이 몸길이가 가장 길어지는 시점에서 적합이 잘 이루어지지 않았다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 몸길이가 일정해지는 시점에서의 적합 역시 잘되지 않은 것을 알 수 있다.

고 찰

현재까지 법곤충학에서 성장시간에 따른 몸길이를 추정하기 위한 연구는 Lecheta와 Moura (2019) [17]가 유일했으며, *S. chlorogaster* (Diptera: Calliphoridae) 종 1령에서 3령의 유충데이터를 갖고 이를 4가지의 모형에 적합시켜 시간에 따

Fig. 1. Growth curves of each species (A, *Calliphora lata*; B, *Calliphora vicina*; C, *Chrysomya pinguis*; D, *Lucilia illustris*) using statistical models. Each scatter plot shows that body length of each species over the growth periods. Then growth curves of each species that fitted to five sigmoid functions were also plotted on scatter plots.

른 유충의 몸길기와 몸무게를 추정하고자 하였다. 분석결과 로지스틱모형이 *S. chlorogaster* 종의 시간에 따른 몸길기와 몸무게를 설명하기 위한 가장 적합한 모형으로 선정되었다. 본 연구에서는 한 가지 종이 아닌 국내에서 흔히 발견되는 여러 파리 종을 대상으로 이들의 성장모형을 추정하기 위해 효과적인 모형이 무엇인지를 알아보려고 하였다. 파리 종의 시간에 따른 몸길이 산점도를 그려보았을 때, 일반적으로 사용되는 직선 형태의 모형보다는 S자 형태의 시그모이드 모형이 더 적합하다고 판단되어 5가지의 시그모이드 함수(이차받침 모형, 브로디모형, 로지스틱모형, 고펜르츠모형, 본 베르탈란 피모형)를 이용한 분석을 하였다.

따라서 본 연구에서 사용한 모든 분석방법을 전체적으로 비교한 결과, 4개의 종 중 3개의 종(붉은뺨검정파리, 큰검정뺨금파리, 연두금파리)에서 로지스틱모형이 가장 높은 적합도를 보였다. Lecheta와 Moura (2019) [17]의 연구에서도 연구대상 종인 *S. chlorogaster*의 성장데이터가 로지스틱모형에 가장 잘 적합되었다. 나머지 한 종(큰검정파리)은 본 베르탈란피모형이 가장 잘 적합되었다. 그 다음으로 높은 적합도를 보인 모형은 모든 종에서 고펜르츠모형이었다. 하지만 위에서도 언급했듯이, 붉은뺨검정파리의 경우 산점도의 모양이 다른 종들과는 차이가 있는 것으로 나타났고, 모형 평가 기준 중 하나로 쓰인 R^2 역시 다른 종들과 비교해서 약 0.5 정도로 낮은 적합도를 보였다. 수집된 데이터를 살펴보면 붉은뺨검정파리는 다른 파리 종들보다 더 오랜 시간 사육된 유충들이 포함된 것을 알 수 있다(Table 1). 큰검정뺨금파리의 경우 성장시간의 최댓값이 195시간이고, 연두금파리의 경우 108시간이지만 붉은뺨검정파리는 469시간으로 더 오랜 기간 수집된 데이터가 있는 것을 알 수 있다. 붉은뺨검정파리와 비슷한 성장시간을 갖는 큰검정뺨금파리의 경우 성장시간의 최댓값이 308시간이다(Table 1). Fig. 1의 산점도를 보면 큰검정파리와 붉은뺨검정파리의 경우 비슷한 기간 동안 수집된 데이터이지만 산점도의 양상은 확연히 다른 것을 알 수 있다. 따라서 붉은뺨검정파리의 산점도와 같이 몸길이가 시간이 지남에 따라 증가하다가 일정 수준에 도달한 뒤 다시 감소한 뒤 일정한 값을 갖는 양상을 보이는 데이터는 시그모이드 함수에 적합시키기 어렵다고 생각되며 이러한 형태의 데이터를 적합시키기 위해서는 비모수적 방법을 이용한 추정 등보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 밴드위스(Bandwidth)를 조절해 분포를 추정하는 커널(kernel)방법 등의 비모수적 추정방법을 이용한다면 붉은뺨검정파리의 산점도와 같이 몸길이가 시간이 흐를수록 증가하다가 일정 수준 도달한 뒤 감소하다가 일정한 값을 갖는 형태의 성장곡선 추정이 좀 더 정교하게 이루어질 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 분석에 사용된 파리 종들이 모두 같은 온도대에서 사육된 데이터를 얻을 수 있다면 각 파리 종에 따른 성장모형을

동일온도에서 비교, 분석하는 연구와 더불어 동일 온도에서 종에 따라 성장과 관련된 다양한 특징을 알아볼 수 있을 것이다.

본 연구는 국내 법의곤충학에서는 한 번도 시도하지 않은 다양한 시그모이드 함수를 이용해 성장곡선을 추정하는 연구를 시행하였다. 이러한 결과는 추후 더 정확한 성장함수 추정의 토대가 될 것으로 생각하며, 이 결과를 바탕으로 사후경과 시간을 추정하는 과학수사에 활용 가능할 것으로 판단된다.

ORCID: Ji Eun Park: <https://orcid.org/0000-0003-4646-3476>; Su Jin Jeong: <https://orcid.org/0000-0001-6754-8925>; Sang Hyun Park: <https://orcid.org/0000-0003-1096-9272>; Sang Eon Shin: <https://orcid.org/0000-0003-4165-8119>; Seong Hwan Park: <https://orcid.org/0000-0003-2096-2664>; Tae-Young Moon: <https://orcid.org/0000-0003-2123-9099>; Jae Won Lee: <https://orcid.org/0000-0002-3718-2704>

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This research was supported and funded by the Korean National Police Agency [Development of entomological methods to improve the estimation of minimum post-mortem interval in medicolegal casework / PA-G000001]. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1A2C1A01008262). We thank Ji-Hwan Lee, Da-Hyun Woo and Bong-Hwan Ji for their field and laboratory assistance.

References

1. Jeong SJ, Park JE, Lee HJ, et al. Effect of environmental conditions on estimation of ambient temperature for minimum postmortem interval (PMI) in Korea. *J Sci Crim Invest* 2017;11:178-85.
2. Kang MK, Jeon CH. The estimation method of time elapsed after death from the changes in the color of the blood. *Korean J Sci Crim Invest* 2014;8:164-70.
3. Ames C, Turner B. Low temperature episodes in development of blowflies: implications for postmortem interval estimation. *Med Vet Entomol* 2003;17:178-86.
4. Park JE, Shin SE, Park SH, et al. A study for estimating growth time of Calliphoridae flies using statistical models. *Korean J Sci Crim Invest* 2019;13:89-94.
5. Schowalter TD. *Insect ecology*. San Diego, CA: Academic Press;

- 2004.
6. Park JE, Jeong SJ, Lee HJ, et al. A study on the distribution of fly species to various ecological conditions: a review from the forensic entomology and statistics point of view. *Korean J Sci Crim Investig* 2018;12:151-9.
7. Zhang Y, Wang Y, Sun J, et al. Temperature-dependent development of the blow fly *Chrysomya pinguis* and its significance in estimating postmortem interval. *R Soc Open Sci* 2019;6:190003.
8. Wang Y, Li LL, Wang JF, et al. Development of the green bottle fly *Lucilia illustris* at constant temperatures. *Forensic Sci Int* 2016;267:136-44.
9. Teleken JT, Galvao AC, de Silva Robazza W. Comparing non-linear mathematical models to describe growth of different animals. *Acta Sci Anim Sci* 2017;39:73-81.
10. France J, Dijkstra J, Dhanoa M. Growth functions and their application in animal science. *Ann Zootech* 1996;45(Suppl 1):165-74.
11. Vazquez JA, Lorenzo JM, Fucinos P, et al. Evaluation of non-linear equations to model different animal growths with mono and bisigmoid profiles. *J Theor Biol* 2012;314:95-105.
12. Beltran JJ, Butts WT Jr, Olson TA, et al. Growth patterns of two lines of Angus cattle selected using predicted growth parameters. *J Anim Sci* 1992;70:734-41.
13. Silva FL, Alencar MM, Freitas AR, et al. Mauricio GB. Growth curves in beef cows of difference biological types. *Pesq Agropec Bras* 2011;46:262-71.
14. Franco D, Garcia A, Vazquez JA, et al. Growth curves in Celta pig breed (Barcine line) at different slaughtered age. *Actas Iberoamericanas Conserv Anim* 2011;1:259-63.
15. Goliomytis M, Ofranios S, Panopoulou E, et al. Growth curves for body weight and carcass components, and carcass composition of the Karagouniko sheep, from birth to 720 d of age. *Small Rumin Res* 2006;66:222-9.
16. Curi PR, Nunes JR, Curi MA. Mathematical models for estimating the rabbit body weight. *Pesq Agropec Bras* 1985;20:853-63.
17. Lecheta MC, Moura MO. Estimating the age of forensically useful blowfly, *Sarconeia chlorogaster* (Diptera: Calliphoridae), using larval length and weight. *J Med Entomol* 2019;56:915-20.
18. Kim HC, Kim SJ, Yun JE et al. Development of the greenbottle blowfly, *Lucilia sericata*, under different temperatures. *Korean J Appl Entomol* 2007;46:141-5.
19. Jauregui MA, Paris Q. Spline response functions for direct and carry-over effects involving a single nutrient. *Soil Sci Soc Am J* 1985;49:140-5.
20. Verhulst PF. Notice on the law that the population follows in its growth. *Corresp Math Phys* 1838;10:113-26.
21. Cramer JS. The origins of logistic regression. Tinbergen Institute Working Paper No. 2002-119/4. Amsterdam: Tinbergen Institute; 2002. p. 167-78.
22. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philos Trans R Soc Lond* 1825;115:513-83.
23. Tjorve KM, Tjorve E. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: an addition to the Unified-Richards family. *PLoS One* 2017;12:e0178691.
24. Von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth. *Hum Biol* 1938;10:181-213.
25. Daniel P, Morgan GR. Length-based methods in fisheries research. Manila: WorldFish; 1987.
26. Kuhleitner M, Brunner N, Nowak WG, et al. Best-fitting growth curves of the von Bertalanffy-Putter type. *Poult Sci* 2019;98:3587-92.
27. Devore JL. Probability and statistics for engineering and the sciences. 8th ed. Boston, MA: Cengage Learning; 2011. p. 508-10.
28. Burnham KP, Anderson DR. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. New York: Springer-Verlag; 2002. p. 60-4.
29. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Automat Control* 1974;19:716-23.
30. Wit E, van den HE, Romeijn JW. 'All models are wrong...': an introduction to model uncertainty. *Stat Neerl* 2012;66:217-36.