

ANIMAL

# Growth curve estimates for wither height, hip height, and body length of Hanwoo steers (*Bos taurus coreanae*)

Hu-Rak Park<sup>1</sup>, Seung-Hoon Eum<sup>1</sup>, Seung-Hee Roh<sup>2</sup>, Du-Won Sun<sup>3,4</sup>, Jakyom Seo<sup>1</sup>, Seong-Keun Cho<sup>1</sup>, Jung-Gyu Lee<sup>4</sup>, Byeong-Woo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Animal Science, College of Natural Resources and Life Science·Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang, Gyeongnam 50463, Korea

<sup>2</sup>Hanwoo Improvement Center, National Agriculture Cooperative Federation, Seosan 31948, Korea

<sup>3</sup>Department of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

<sup>4</sup>Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

\*Corresponding author: kimbw@pusan.ac.kr

## Abstract

Growth curves in Hanwoo steers were estimated by Gompertz, Von Bertalanffy, Logistic, and Brody nonlinear models using growth data collected by the Hanwoo Improvement Center from a total of 6,973 Hanwoo (*Bos taurus coreanae*) steers 6 to 24 months old that were born between 1996 and 2015. The data included three parameters: A, mature size of body measurement; b, growth ratio; and, k, intrinsic growth rate. Nonlinear regression equations for wither height according to Gompertz, Von Bertalanffy, Logistic, and Brody models were  $Y_t = 144.7e^{-0.5869e^{-0.00301t}}$ ,  $Y_t = 145.3(1 - 0.1816e^{-0.00284t})^3$ ,  $Y_t = 143.1(1 + 0.7356e^{-0.00352t})^{-1}$ , and  $Y_t = 146.8(1 + 0.4700e^{-0.00249t})^1$ , respectively, while those for hip height were  $Y_t = 144.5e^{-0.5549e^{-0.00312t}}$ ,  $Y_t = 145.0(1 - 0.1724e^{-0.00295t})^3$ ,  $Y_t = 143.1(1 + 0.6863e^{-0.00360t})^{-1}$ , and  $Y_t = 146.2(1 + 0.4501e^{-0.00263t})^1$ , respectively. Equations for body length  $Y_t = 174.1e^{-0.8342e^{-0.00289t}}$ ,  $Y_t = 175.8(1 - 0.2500e^{-0.00265t})^3$ ,  $Y_t = 170.0(1 + 1.1548e^{-0.00363t})^{-1}$ , and  $Y_t = 180.3(1 + 0.6077e^{-0.00215t})^1$ , respectively, for the same models. Among the four models, the Brody model resulted in the lowest mean square error, with mean square errors of 31.79, 30.57, and 42.13, respectively, for wither height, hip height, and body length. Also, an estimated birth wither height, birth hip height, and birth body length (77.98, 80.57, and 70.97 cm, respectively) were lower in the Brody model than in other models. An inflection point was not observed during the growth phase of Hanwoo steer according to the growth curves calculated using Gompertz, Von Bertalanffy, and Logistic models. Based on the results, we concluded that the regression equation using the Brody model was the most appropriate among the four growth models. To obtain more accurate parameters, however, using data from a wider production period (from birth to shipping) would be required, and the development of a suitable model for body conformation traits would be needed.

**Keywords:** body length, growth curve, Hanwoo, hip height, wither height



 OPEN ACCESS

**Citation:** Park HR, Eum SH, Roh SH, Sun DW, Seo J, Cho SK, Lee JG, Kim BW. 2017. Growth curve estimates for wither height, hip height, and body length of Hanwoo steers (*Bos taurus coreanae*). Korean Journal of Agricultural Science 44:384-391.

**DOI:** <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170030>


**Editor:** Jung Min Heo, Chungnam National University, Korea

**Received:** November 16, 2016

**Revised:** February 21, 2017

**Accepted:** February 23, 2017

**Copyright:** © 2017 Korean Journal of Agricultural Science.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Introduction

한우와 같은 육용 경제동물에게 있어서 성장특성에 관한 연구는 매우 중요한 요소이다. 특정 품종, 성별과 같은 개체의 특성에 따른 체중 및 체형형질의 성장특성의 파악을 통해 그에 적합한 사양방법의 선택, 적정 출하시기의 선택 및 종축으로 선정하기 위한 평가 등은 가축 개량에 필수적이라 할 수 있다.

개체의 출생부터 출하시기까지의 일령에 따른 체중 및 체형 파악을 위해 연속적인 자료를 수집하는 데에는 많은 어려움이 따르기 때문에 측정하지 못한 시기에 따른 측정치를 파악하기 위해서 이용되는 한가지 방법으로 비선형 모델을 이용한 성장곡선 추정이 이용된다(Brown et al., 1976). Gompertz (Winsor, 1932), Brody (Brody, 1945), Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1957) 및 Logistic (Nelder, 1961) 등의 비선형 회귀식을 이용한 육우의 성장곡선을 추정을 위한 많은 연구가 해외에서부터 이루어졌으며(Brown et al., 1976; Nelsen et al., 1982; Menchaca et al., 1996) 국내에서도 한우를 이용한 연구가 진행되었다(Kim et al., 1996; Cho et al., 2002; Kim et al., 2002; Lee et al., 2003; Yun et al., 2016). 또한 개체에 적절한 성장 특성 파악을 통해 성장기 체형치로 성숙 시 수치를 추정하여 종모축 조기 선발 및 비육우의 사양관리에 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

국내에서 이루어진 대부분의 연구들은 일령 및 월령에 따른 체중에 관한 연구였으며, 체고, 십자부고와 같은 체형형질에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 체형형질은 종축의 선발에 있어 체중, 초음파와 함께 평가항목에 포함되며, 한우의 외형을 결정하는 중요한 형질이다. 또한 Mukai et al. (1995)과 Sun et al. (2008)의 연구에 따르면 체형형질과 주요 경제형질인 도체형질과는 표현형, 유전적으로 유의적 상관이 있다고 보고하여 체형형질 성장 특성 연구를 통해 간접적으로 도체형질의 성장특성을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구는 거세우의 일령별 체고, 십자부고 및 체장 자료를 이용하여 체형형질에 적합한 성장곡선을 추정하고 한우 거세우의 성장특성을 알아보며, 이를 통해 한우 종모축의 조기 선발 및 비육우의 사양관리를 위한 기초자료로 이용하고자 한다.

## Materials and Methods

### 공시재료

분석에 이용된 자료는 후보종모우의 유전능력 평가를 위한 후대검정시 측정된 후대검정우 6,973두의 월령에 따른 체형형질(체고, 십자부고 및 체장) 측정치를 이용하였다. 후대검정우는 1996년부터 2015년 사이에 출생하였으며, 후대검정(농림축산식품부고시 제2014-128호 ‘가축검정기준’) 절차에 따라 사양관리되었고, 5 - 6개월령에 거세하여 6개월령부터 시작하여 출하시기까지 검정을 실시하였다(연도별로 검정기준 변경에 따른 측정 시기의 차이가 있다). 월령에 따른 체형형질 측정치는 측정일과 생년월일간의 차이를 통해 일령에 따른 체형형질 측정치로 변환하였으며 측정 월령별 측정일의 분포는 Table 1과 같으며 분석에 이용된 체고, 십자부고 및 체장의 측정위치는 다음과 같다.

체고(wither height): 기갑의 정점에서 지면까지의 수직거리

십자부고(hip height): 십자부에서 지면까지의 수직거리

체장(body length): 어깨전단에서 좌골후단을 직선으로 이은 수평거리

개체당 측정 횟수는 고려하지않고 측정월령별 체형데이터를 모두 이용하였으며, 한우 거세우 집단의 측정 월령별 체형형질의 평균에서 과도하게 벗어나는 이상치를 제거하고, 검정기간 중은 성장기이므로 동일한 개체 내에서 직전 측정치보다 감소하는 측정치는 이상치로(측정 또는 입력상의 오류 및 비정상적 개체) 간주하여 제거하여 총

**Table 1.** Simple statistics for age (day) according to herd representative age at body conformation trait measurement.

Measurement age <sup>z</sup> (month)	n	Age (day)			
		Mean ± SD	Min	Max	Coefficient of variation
6	1,176	180.42 ± 22.583	119	245	12.52
12	4,207	367.03 ± 24.279	299	435	6.61
18	4,829	544.91 ± 27.753	414	627	5.09
24	2,667	705.96 ± 19.654	645	764	2.78

<sup>z</sup>Herd representative age of Hanwoo steers at body conformation trait (height, hip height, and body length) measurement.

**Table 2.** Simple statistics for observed size of body conformation according to herd representative age at body conformation trait measurement.

Measurement age <sup>z</sup> (month)	n	Type of body conformation	Observed size of body conformation (cm)			
			Mean ± SD	Min	Max	Coefficient of variation
6	1,176	Wither height	101.83 ± 4.832	85	117	4.74
		Hip height	104.43 ± 4.873	87	120	4.67
		Body length	105.44 ± 7.159	82	126	6.79
12	4,207	Wither height	119.90 ± 4.977	101	137	4.15
		Hip height	121.77 ± 4.736	102	139	3.89
		Body length	130.96 ± 6.530	110	153	4.99
18	4,829	Wither height	127.61 ± 6.412	104	145	5.02
		Hip height	129.11 ± 6.444	105	147	4.99
		Body length	145.57 ± 6.968	122	169	4.79
24	2,667	Wither height	136.57 ± 4.151	122	150	3.04
		Hip height	137.48 ± 4.065	124	151	2.96
		Body length	157.10 ± 6.303	130	177	4.01

<sup>z</sup>Herd representative age of Hanwoo steers at body conformation trait (height, hip height, and body length) measurement.

12,879개의 일령에 따른 체고, 십자부고 및 체장 데이터를 이용하였다. 월령에 따른 체형형질의 일반통계량은 Table 2와 같다. 측정개월령이 증가함에 따라 변동계수는 증가하지 않아 개체간의 변이가 증가하지 않음을 알 수 있었으며, 이는 체형형질의 경우 성장함에 따라 환경적 변이가 크게 작용하지 않은 것으로 사료된다.

### 통계분석 방법

한우 거세우의 성장곡선 추정을 위해 이용한 비선형 모형은 총 4개로, Gompertz (Winsor, 1932), Brody (Brody, 1945), Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1957) 및 Logistic (Nelder, 1961) 이며 각 모형의 방정식은 Table 3와 같다. Gompertz, Von Bertalanffy 및 Logistic 비선형 모형은 측정시기  $t$  (일령)에 따른  $Y_t$  (추정 체형치)를 나타내며 변곡

**Table 3.** Non-linear models used to estimate growth curve.

Model	Equation
Gompertz	$Y_t = Ae^{-be^{-kt}}$
Von Bertalanffy	$Y_t = A(1 - be^{-kt})^3$
Logistic	$Y_t = A(1 - be^{-kt})^{-1}$
Brody	$Y_t = A(1 - be^{-kt})$

점이 존재하는 sigmoid곡선을 이룬다. Brody 비선형 모형 역시 일령에 따른 추정치를 나타내나, sigmoid곡선이 아닌 변곡점이 존재하지 않는 자연로그함수의 형태를 보인다.

Table 3의 방정식에서 모수  $A$ 는 일령  $t$ 가 무한대로 갔을 때 수렴하는  $Y_t$ 값을 나타내는 모수이며,  $b$ 는 성장비율에 관한 모수,  $k$ 는 성숙률에 관한 모수로 수치가 높을수록 조숙성임을 나타낸다.

조사된 12,879두의 일령에 따른 체형형질의 측정치를 한 거세우 집단의 측정치로 가정하고 SAS 9.4의 PROC NLIN 비선형 회귀 분석 프로시저를 이용하여 모수 추정이 간편한(Nelsen, 1982) Gauss-Newton 비선형 반복해법 방식을 통해 잔차제곱합을 최소화시키면서 한우 거세우 집단의 성장모형별 모수  $A$ ,  $b$  그리고  $k$ 를 추정하였다.

## Results and Discussion

12,879개의 일령별 체고, 십자부고 및 체장 측정치를 통해 한우 거세우의 비선형 모형으로 추정한 성장곡선의 모수와 모형 평가를 위한 오차제곱평균(MSE; mean square error)을 Table 4에 나타내었다. 오차제곱평균은 비선형 회귀모형에 있어서 모델적합도를 평가하는 하나의 기준으로 이용되며, 그 수치가 낮을수록 적합하다고 할 수 있다. 성숙 시 체형형질 추정치인 모수  $A$ 는 Brody 모형에서 체고, 십자부고 그리고 체장이 각각  $146.8 \pm 0.5883$  cm,  $146.2 \pm 0.5218$  cm 및  $180.3 \pm 0.8947$  cm로 네 가지 모형중에서 가장 높게 추정되었으며, Logistic 모형에서 체고, 십자부고 및 체장이 각각  $143.1 \pm 0.4184$  cm,  $143.1 \pm 0.3833$  cm 및  $170.0 \pm 0.5186$  cm로 네 모형중에서 가장 낮게 추정되었다. 성숙률을 나타내는  $k$ 값의 경우 십자부고가 체고 및 체장보다 Logistic 모형을 제외한 나머지 모형에서 가장 큰 값을 보여 나머지 두 형질에 비해 비교적 성숙이 빠른 것으로 사료된다. Choi et al. (2008)은 거세우를 Logistic 모형을 이용하여 체중 및 체형형질의 성장곡선을 추정하였는데, 그 중 체고, 십자부고 및 체장의 모수  $A$ 가  $155.5 \pm 4.2$ ,  $164.9 \pm 5.8$  및  $168.5 \pm 2.9$ , 모수는  $0.95 \pm 0.03$ ,  $0.99 \pm 0.04$  및  $1.27 \pm 0.02$  였으며  $k$ 는  $0.00217 \pm 0.0017$ ,  $0.00200 \pm 0.00017$  그리고  $0.00317 \pm 0.00019$ 로 보고하여, 본 실험의 모수  $A$ 의 추정치보다 체고와 십자부고는 크게, 체장은 작게 추정되었으며,  $b$ 는 모두 높게 추정되었다. 반면  $k$ 값의 경우는 본 실험이 더 높게 추정되었다.

Choi et al. (2008) 한우 거세우의 체중 및 체형형질의 성장곡선 모수 추정을 위한 실험준비단계에서 모형 선택을 위해 Gompertz, Logistic 그리고 Von Bertalanffy 모형을 비교했을 때 Logistic 모형이 가장 낮은 오차제곱합을 보였다고 보고하였다. 본 연구에서는 오차제곱평균은 체고, 십자부고 및 체장에서 Logistic 모형이 각각 32.05, 30.80

**Table 4.** Mean, standard error, and mean square error of growth curve parameters.

Type of body conformation	Model	Parameters			MSE (Mean square error)
		$k \pm SE$	$b \pm SE$	$k \pm SE$	
Wither height	Gompertz	$144.7 \pm 0.4872$	$0.59 \pm 0.0043$	$0.00301 \pm 0.000063$	31.91
	Von Bertalanffy	$145.3 \pm 0.5163$	$0.18 \pm 0.0012$	$0.00284 \pm 0.000062$	31.87
	Logistic	$143.1 \pm 0.4184$	$0.73 \pm 0.0063$	$0.00352 \pm 0.000065$	32.05
	Brody	$146.8 \pm 0.5883$	$0.47 \pm 0.0028$	$0.00249 \pm 0.000061$	31.79
Hip height	Gompertz	$144.5 \pm 0.4406$	$0.55 \pm 0.0043$	$0.00312 \pm 0.000065$	30.68
	Von Bertalanffy	$145.0 \pm 0.4644$	$0.17 \pm 0.0013$	$0.00295 \pm 0.000064$	30.65
	Logistic	$143.1 \pm 0.3833$	$0.69 \pm 0.0062$	$0.00360 \pm 0.000067$	30.80
	Brody	$146.2 \pm 0.5218$	$0.45 \pm 0.0030$	$0.00263 \pm 0.000063$	30.57
Body length	Gompertz	$174.1 \pm 0.6535$	$0.83 \pm 0.0044$	$0.00289 \pm 0.000046$	42.33
	Von Bertalanffy	$175.8 \pm 0.7173$	$0.25 \pm 0.0012$	$0.00265 \pm 0.000046$	42.26
	Logistic	$170.0 \pm 0.5186$	$1.15 \pm 0.0079$	$0.00363 \pm 0.000049$	42.56
	Brody	$180.3 \pm 0.8947$	$0.61 \pm 0.0024$	$0.00215 \pm 0.000044$	42.13

및 42.56으로 가장 높게 나타났고, Brody 모형이 각각 31.79, 30.57 및 42.13으로 네 모형중에 가장 낮게 나타나 Brody 모형이 오차제곱평균 수치를 통한 모델적합도에서는 가장 적합하다고 사료된다.

Fig. 1, Fig. 2 그리고 Fig. 3에는 각각 체고, 십자부고 및 체장의 측정치와 모형별로 추정된 성장곡선을 나타내었다. 체고, 십자부고 및 체장에서 추정된 네 종류의 성장곡선간에는 생시부터 100일령(3.3개월령)까지 눈에 띄는 차이를 보이거나, 그 이후부터 1,000일령(33.3개월령)까지는 모형간에 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 변곡점이 존재하는 sigmoid형태의 Gompertz, Von Bertalanffy 및 Logistic 모형에서 한우 거세우의 성장기간 중 변곡점이 나타나

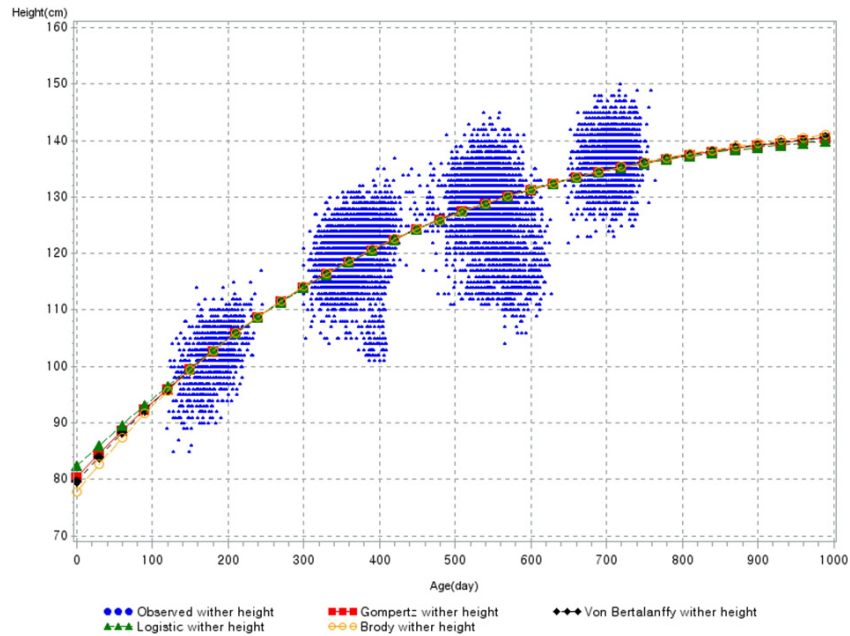


Fig. 1. Observed wither height and estimated wither height growth curves according to each growth model.

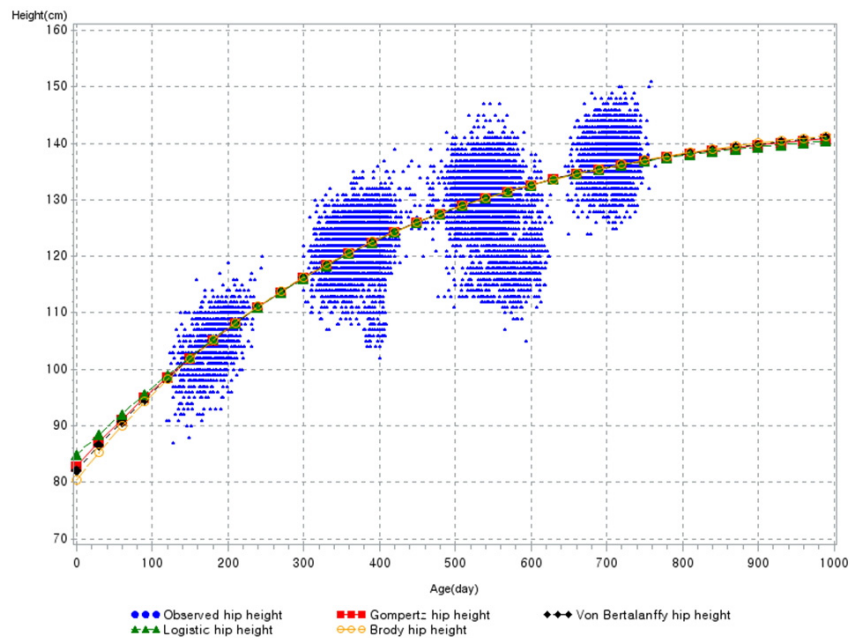
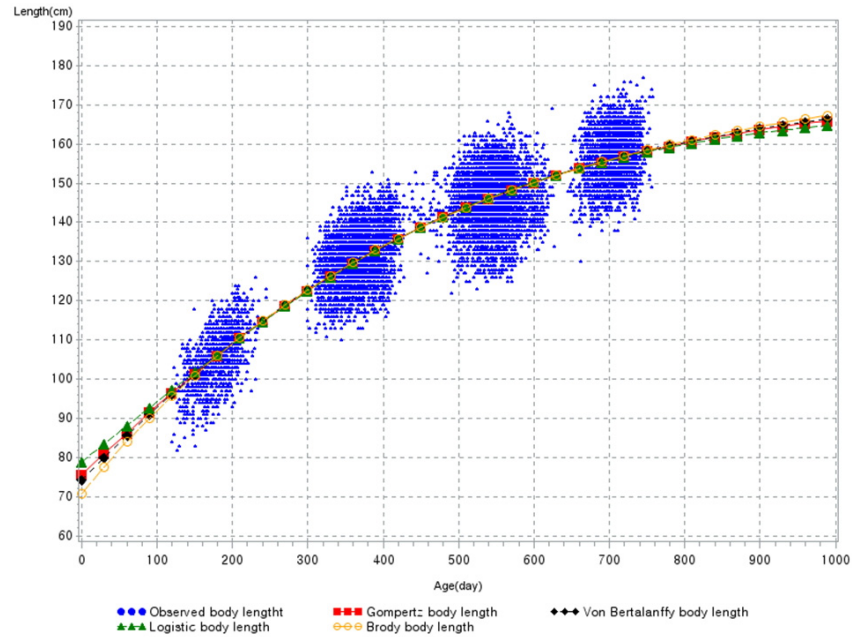


Fig. 2. Observed hip height and estimated hip height growth curves according to each growth model.



**Fig. 3.** Observed body length and estimated body length growth curves according to each growth model.

**Table 5.** Observed and predicted sizes of body conformation traits for each model.

Type of body conformation	Age (day)	n	Mean of observed size of body conformation (cm)	Predicted size of body conformation (cm)			
				Gompertz	Von Bertalanffy	Logistic	Brody
Wither height	1	-	-	80.60	79.80	82.57	77.98
	170 - 190	381	101.80	102.85	102.80	102.92	102.72
	350 - 370	1,342	119.88	118.63	118.64	118.54	118.64
	530 - 550	1,575	128.73	128.91	128.88	128.92	128.81
	710 - 730	950	136.88	139.13	139.23	138.75	139.48
	930 - 950	-	-	139.77	139.88	139.35	140.16
Hip height	1	-	-	83.11	82.34	84.98	80.57
	170 - 190	381	104.45	105.30	105.22	105.30	105.21
	350 - 370	1,342	121.74	120.64	120.58	120.47	120.67
	530 - 550	1,575	130.11	130.37	130.28	130.30	130.30
	710 - 730	950	137.61	139.71	139.77	139.30	140.03
	930 - 950	-	-	140.29	140.36	139.84	140.65
Body length	1	-	-	75.78	74.36	79.05	70.97
	170 - 190	381	105.60	106.03	106.00	106.19	105.89
	350 - 370	1,342	130.55	129.65	129.74	129.51	129.77
	530 - 550	1,575	145.58	146.12	146.12	146.22	145.98
	710 - 730	950	157.91	163.64	163.95	162.74	164.57
	930 - 950	-	-	164.76	165.10	163.76	165.78

지 않아 체중과는 달리 체형형질의 성장곡선에는 변곡점이 존재하지 않으며, 생시 이후부터 서서히 성장속도가 감소하는 형태를 보임을 알 수 있었다. Choi et al. (2008) 은 Logistic 모형을 이용하여 추정한 한우 거세우의 체고와 십자부고의 변곡점 일령이 -24.02일과 -3.51로 성장기간 중 존재하지않아 본 연구의 결구와 유사하였고, 체장의 경

우 76.56일로 추정되었다고 보고하였다.

Table 5에는 주요 측정일령에 따른 체형형질의 실제 측정치 평균과 각 모형별 추정치를 나타내었다. Gompertz 모형으로 추정된 체고, 십자부고 및 체장이 다른 모형들에 비해 실제 측정치 평균에서 가장 벗어나는 수치를 보였다. 또한 Brody 모형이 다른 세 모형에 비해 눈에 띄게 낮은 생시 측정치를 모든 형질에서 나타내었다. Jersey종 암컷을 이용한 Brown et al. (1976)의 연구에 따르면, 6개월령 이후의 데이터를 이용한 성장곡선 추정에 있어 Brody 모형이 적합하나, 6개월령 이전의 일령에 따른 추정치에 있어 과대 또는 과소 추정되는 경향이 있다고 밝혀 본 연구의 결과와 유사하였다.

## Conclusion

한우 거세우의 체형형질인 체고, 십자부고 및 체장의 일령별 측정치를 토대로 Gompertz, Von Bertalanffy, Logistic 및 Brody 모형을 이용하여 성장곡선을 추정해본 결과, 세 체형형질의 성숙 시 추정치 모수  $A$ 가 가장 높게 추정된 Brody 모형이 오차제곱평균이 네 모형중에서 가장 낮게 나타났으며 추정된 성장곡선에서 한우의 성장기간 중 변곡점이 관찰되지 않아 Gompertz, Von Bertalanffy 및 Logistic 모형보다 Brody 모형이 더욱 적합한것으로 나타났다. 한우 거세우의 성장과정에서는 체고, 십자부고 및 체장의 경우 생후 일당 체형 성장치가 증가하지 않고 생후부터 지속적으로 감소한다는 것을 나타낸다. 이는 변곡점이 존재하는 육우 체중의 성장곡선과는 다른 결과를 나타낸다.

하지만 최근 개량 추세에 맞추어 더욱 적합한 거세우 성장곡선 추정을 위해서는 개체당 측정 횟수를 늘리고, 생시체중에서부터의 데이터 수집이 요구된다. 또한 차후 모형 설정에 있어 한우의 체형형질에 영향을 미치는 다양한 환경효과를 고려하고, 한우에 더 적합한 모형 개발을 위한 연구를 통해 한우 개량을 위한 종모우 조기선발을 위한 기초자료로의 이용 및 한우의 체형형질 발육표준 정립에 기여하고자 한다.

## Acknowledgements

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Brody S. 1945. Bioenergetics and growth; with special reference to the efficiency complex in domestic animals. Reinhold publishing corp., NY, USA.
- Brown JE, Fitzhugh, HA, Cartwright TC. 1976. Comparison of nonlinear models for describing weight-age relationships in cattle. *Journal of Animal Science* 42:810-818.
- Cho YM, Yoon HB, Park BH, Ahn BS, Jeon BS, Park YI. 2002. Study on the optimum range of weight-age data for estimation of growth curve parameters of Hanwoo. *Journal of Animal Science and Technology* 44:165-170. [in Korean]
- Choi TJ, Seo KS, Kim SD, Cho KH, Choi JG, Hwang IH, Choi HS, Park CJ. 2008. Estimation of growth curve parameters for body weight and measurements in castrated Hanwoo (*Bos taurus coreanae*). *Journal of Animal Science and Technology* 50:601-612. [in Korean]
- Kim NS, Joo JC, Lee DH. 1996. Estimation of growth curve parameters in Hanwoo for system analysis. *Korean Journal of Animal Science* 38:119-124. [in Korean]
- Kim NS, Ju JC, Song MK, Chung CS, Choi YI, Park CJ. 2002. Growth curve characteristics of bull and steer of Hanwoo

- (Korean cattle). *Journal of Animal Science and Technology* 44:519-522. [in Korean]
- Lee CW, Choi JG, Jeon KJ, Na KJ, Lee CY, Yang BK, Kim JB. 2003. Estimation of growth curve for evaluation of growth characteristics for Hanwoo cows. *Journal of Animal Science and Technology* 45:509-516. [in Korean]
- Menchaca MA, Chase Jr. CC, Olson TA and Hammond AC. 1996. Evaluation of growth curves of brahman cattle of various frame sizes. *Journal of Animal Science* 74:2140-2151.
- Mukai F, Oyama K, Kohno S. 1995. Genetic relationships between performance test traits and field carcass traits in Japanese black cattle. *Livestock Production Science* 44:199-205.
- Nelder JA. 1961. The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics* 17:89-110.
- Nelsen TC, Long CR, Cartwright TC. 1982. Postinflection growth in straightbred and crossbred cattle. I. Heterosis for weight, height and maturing rate. *Journal of Animal Science* 55:280-292.
- Sun DW, Kim BW, Park JW, Moon WG, Choo H J, Jeon JT, Lee JG. 2008. The effect of body measurements type on carcass traits in Hanwoo. *Journal of Animal Science and Technology* 50:763-774. [in Korean]
- Von Bertalanffy L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *The Quarterly Review of Biology* 32:217-231.
- Winsor CP. 1932. The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 18:1-8.
- Yun JW, Park SY, Park HR, Eum SH, Roh SH, Seo JK, Cho SK, Kim BW. 2016. Estimation of growth curve in Hanwoo steers using progeny test records. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:623-633. [in Korean]