

지하 수위가 다른 조건에서 콩의 초장과 경태 모델링

Modeling Growth of Canopy Heights and Stem Diameters in Soybeans at Different Groundwater Level

최진영¹, 김동현¹, 권순홍¹, 최원식¹, 김종순^{1*}

Jin-Young Choi¹, Dong-Hyun Kim¹, Soon-Hong Kwon¹, Won-Sik Choi¹, Jong-Soon Kim^{1*}

〈Abstract〉

Cultivating soybeans in rice paddy field reduces labor costs and increases the yield. Soybeans, however, are highly susceptible to excessive soil water in paddy field. Controlled drainage system can adjust groundwater level (GWL) and control soil moisture content, resulting in improvement soil environments for optimum crop growth. The objective of this study was to fit the soybean growth data (canopy height and stem diameter) using Gompertz model and Logistic model at different GWL and validate those models. The soybean, Daewon cultivar, was grown on the lysimeters controlled GWL (20cm and 40cm). The soil textures were silt loam and sandy loam. The canopy height and stem diameter were measured from the 20th days after seeding until harvest. The Gompertz and Logistic models were fitted with the growth data and each growth rate and maximum growth value was estimated. At the canopy height, the R_2 and RMSE were 0.99 and 1.58 in Gompertz model and 0.99 and 1.33 in Logistic model, respectively. The large discrepancy was shown in full maturity stage (R8), where plants have shed substantial amount of leaves. Regardless of soil texture, the maximum growth values at 40cm GWL were greater than the value at 20cm GWL. The growth rates were larger at silt loam. At the stem diameter, the R_2 and RMSE were 0.96 and 0.27 in Gompertz model and 0.96 and 0.26 in Logistic model, respectively. Unlike the canopy height, the stem diameter in R8 stage didn't decrease significantly. At both GWLs, the maximum growth values and the growth rates at silt loam were all larger than the values at sandy loam. In conclusion, Gompertz model and Logistic model both well fit the canopy heights and stem diameters of soybeans. These growth models can provide invaluable information for the development of precision water management system.

^{1*} 정회원, 교신저자, 부산대학교
바이오산업기계공학과, 교수
경상남도 밀양시 삼랑진읍 삼랑진로 1268-50
우편번호 50463
E-mail: jongsoon-kim@pusan.ac.kr Tel:+82-55-350-5426

^{1*} Corresponding Author, Professor, Dept. of
Bio-Industrial Machinery Eng., Pusan Natl. Univ
Gyeongsangnam-do Miryang-si Sangnamjin-eub
Sangnamjin-ro 1268-50, 50463 REPUBLIC OF KOREA

Keywords : Soybean, Gompertz Modeling, Logistic Modeling, Canopy height, Stem diameter

1. 서론

콩은 동북아시아를 원산지로서 하여 오래 전부터 우리나라를 중심으로 전 세계에서 재배되는 열매 채소다. 우리나라에서는 콩을 삼국시대부터 재배 하였으며 20세기 들어 동서양을 막론하고 생산과 이용 면에서 세계 최고의 작물로 부상하였고 21 세기에도 여전히 주목 받는 작물이다.

콩은 서늘한 곳을 좋아하는 특징이 있어 파종을 땅의 온도가 약 15°C가 되는 5월 상순과 중순에 하는데, 여름형은 일찍 가을형은 약간 늦게 한다. 또한 콩은 꽃이 피는 개화시부터 약 1개월 동안 전 생육기간 흡수하는 수분의 약 80%정도 흡수하는 만큼 다른 작물에 비하여 생장에 필요한 수분요구량이 높은 작물로 생육에 수분을 많이 필요로 하여 물 빠짐이 좋고 양지바른 곳에 콩을 심는 것이 좋다. 배수가 불량한 농경지에서 토양수분이 과다하게 되면 토양공극에 수분이 포화되어 작물에 산소공급이 부족하게 되고 토양환원에 의한 유해 물질의 발생 등으로 미생물의 활동이 제한되어 작물에 스트레스를 주게 된다[1-5]. 콩과 같은 발작물의 경우 토양 내 수분조건에 따라 생육반응이 민감하게 반응하여 때로는 시비 요인보다 더 수량성에 영향을 미치기 때문에 적절한 토양수분 관리가 더욱 중요하다[6].

적절한 토양수분 관리의 요건으로는 식물이 선호하는 토양 환경을 만들어 주는 것, 뿌리가 자라는 것에 맞게 물을 주는 범위를 정하는 것, 식물이 소모하는 물량에 알맞게 물을 주는 것 등이 있다.

최근 농업환경 및 농업정책이 급격하게 변화함에 따라 논의 토지이용형태에서 논의 타 용도로

전환되는 범용농지의 면적이 크게 증가함에 따라 발작물을 논에서 재배하는 것에 대한 관심도가 높아졌다[7]. 논 콩 재배를 하면 노동력 절감에 유리하고 수확량이 높아진다는 장점이 있다. 그러나 논에서 콩을 재배 할 경우 콩은 습해에 취약하고 토양 과습으로 인해 산소공급이 부족하게 되며 식물체의 2차적 대사과정 속에서의 독성이나 양분결핍현상이 나타나 생산성이 낮아질 우려가 있다. 따라서 콩 재배 시 토양의 특성을 파악하고 적정 토양 수분을 유지하여 주는 것이 중요하다 [8].

토양은 흡입자의 구성에 따라 종류와 수분함량이 달라진다. 우선 토양은 자갈, 모래, 실트, 점토 등 여러 가지 크기의 입경의 흙 입자로 구성된다. 토양의 종류로는 식토, 양토, 식양토, 사양토, 사질 식양토 등이 있다. 대표적으로 논토성인 식양토는 모래가 28%, 미사가 37%, 점토가 35% 내외 분포되어 있고, 발토성인 사양토는 모래가 65%, 미사가 25%, 점토가 10% 내외이다[9]. 모래, 미사, 점토는 지름에 따라 구분하며 모래는 2~0.02mm, 미사는 0.02~0.002mm, 점토는 0.002mm 이하이다. 특히 점토는 모래나 미사에 비해서 단위무게당 표면적이 훨씬 넓으므로 토양 중에서는 부식과 함께 가장 활동적인 부분이며, 수분 및 양분의 보유력이 강하다. 그렇기 때문에 점토 함량이 높은 토양일수록 토양 수분 함량이 높다[10].

토양 수분 함량은 토성에 따라 배수량과 수분 함량이 다를 뿐만 아니라 지하수위의 차이로도 달라진다. 지하수위는 토양단면에서 지하수면까지의 깊이로 토양에서 공급되는 삼투수의 양에 따라 높낮이가 달라진다. 지하수위는 토양수분과 밀접한 관계가 있어 지하수위 관측 자료는 증발산량 관측

자료와 함께 작물포장의 물수지 파악에 큰 도움이 된다. 보리, 밀, 조 3개 곡류작물에 대하여 Kim 등[11]은 이 지하수위를 0, 25, 50, 75, 100 cm 등 5개로 달리한 후 작물 성장량을 측정한 연구 결과에 따르면 보리와 밀의 경우 지하수위 50cm 및 75cm 처리가 100cm 처리와 비교할 때 각각 75~110% 및 91~102%의 성장량을 보이며 지하수위 75cm 처리에서 가장 높았고 과습 조건일수록 감소되는 경향을 보였다. 이는 지하수위가 낮을수록 보리와 밀의 성장량이 좋다고 볼 수 있다. 조의 경우에도 이와 유사하게 100cm 처리구에서 가장 높은 성장량을 보였다.

논 토양에서의 콩(대원콩) 재배 시 생육 단계별 성장반응을 비교해보면 생육초기(출아기)의 초장과 경태는 각각 16cm, 3.9mm이나 개화성기 즉, 생식 성장기에서는 44cm, 5.9mm가 되었다. 이후 종자의 성숙이 완성되는 수확기에서의 초장 및 경태는 65cm, 8.3mm로 성장하였다[12]. 품종간의 차이도 크지만 재배조건에 따라 토양수분함량과 지하수위가 높은 논에서는 생육이 크게 달라서 콩 생산의 제한요인이 된다[13]. 또한 지하수위는 지형적, 계절적 영향이 크고 수분특성에 맞추어 밭작물을 생산하기 위하여 논으로서 기능을 유지하며 지하수위를 자유롭게 설정할 수 있는 정밀 물관리 기술이 필요하다.

물관리를 위해 작물의 성장 모델링에는 Logistic 함수, Gompertz 함수 등을 사용할 수 있다. Logistic 함수는 식물이 초기 생육에는 지수 형태로 생육하다가 식물간의 잎이 겹치지면서 선형 형태로 생육하는 형태를 표현한 식이고 Gompertz 함수는 실험적 접근 방법으로 유도된 성장식으로 처음에는 완만하게 증가하다가 급속하게 성장하는 부분을 거쳐 마지막에는 서서히 성장한 후 정지하게 되는 모양이다. Gompertz 함수는 종속 변수와 설명 변수를 지수적으로 관련시키는 특징이 있어

복잡한 요소를 포함하고 있는 작물의 성장 모델링에 많이 사용된다[14]. 하지만 아직까지 콩의 성장 모델에 Gompertz 함수가 사용된 적이 없다.

따라서 본 연구는 논에서 밭작물(콩)의 안정적인 생산을 위해 원통형 라이시미터를 설치 후 지하수위와 토양을 논토성인 식양질과 밭토성인 사양질로 달리하여 콩의 생육을 측정하고 Gompertz 함수를 사용해 모델링하며 각종 장래 예측치의 추정에 이용하는 Logistic 함수와 비교 분석하여 정밀 물관리 기술 개발에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 작물 생육 환경 및 성장 데이터 수집

본 시험에서 대원콩을 토양의 성질과 지하수위를 다르게 처리한 라이시미터에서 재배하였다. 대원콩은 도복, 콩바이러스 및 탈립에 강하고 제주 및 산간 고랭지를 제외한 전국에서 적응성 있는 품종이다. 본 시험은 2016년 7월 5일에 파종하여 2016년 10월 17일~28일에 수확하였다. 파종 20일 이후 일주일 간격으로 초장과 경태를 측정하였다.

시험 토양은 논토성인 식양질과 밭토성인 사양질로 구성하였으며 시험 전 토양의 용적밀도를 균일하게 하기 위하여 자연배수를 2회 반복하였다. 지름 30cm, 높이 50cm인 스테인레스 스틸로 제작된 라이시미터에 지하수위를 각각 20cm와 40cm로 유지하여 재배하였다 (Fig. 1). 강우로 인해 추가로 수분이 공급되는 것을 막기 위하여 유리온실에서 재배하였고, 기타 재배 환경을 동일하게 하기 위해 온실의 측면을 열어 온도와 습도를 외부와 같게 하였다.

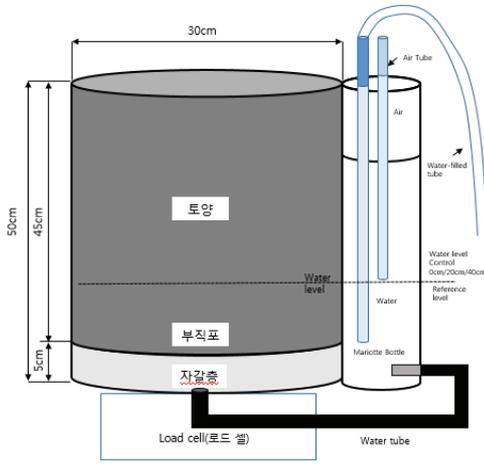


Fig. 1 Mariotte bottle type lysimeter for growing soybeans

2.2 생장 모델

시험 토양에서의 콩 재배 시 생육을 측정하고 모델링하기 위하여 미생물 생장 예측 연구에 널리 사용되는 Gompertz 함수를 사용하였다[15-17]. Gompertz 함수는 S의 형태이며 0에 가까운 작은 값에서 일정한 유한한 값에 접근하는 함수이다. 두 점근선이 곡선에 대칭으로 접근하며 중간쯤에서 변곡점을 갖는 단순한 Sigmoid 함수와는 대조적이며 콩의 초장과 경태를 측정 후 모델링하기 위하여 사용한 수식은 (1)과 같다.

$$y(t) = ae^{-e^{-k(x-x_c)}} \quad (1)$$

where, a : asymptote

k : growth rate

x_c : center of the model

Gompertz 함수와 비교 분석하기 위해 사용하는 Logistic 함수는 종속 변수와 독립 변수간의

관계를 구체적인 함수로 나타내어 향후 예측 모델에 사용되며 실제 자료를 이용해 각 방법이 어떻게 적용될 수 있는지 예상하고 분석하는데 이용된다[18]. Logistic 함수도 Gompertz 함수와 동일하게 S자 형태이며 수식은 (2)와 같다.

$$y(t) = \frac{a}{1 + e^{-k(x-x_c)}} \quad (2)$$

where, a : asymptote

k : growth rate

x_c : center of the model

2.3 통계분석

실험데이터의 모델 추정에는 데이터 분석 프로그램인 Origin (OriginLab, Northampton, MA) 을 이용하였다. 처리평균간의 비교는 일원배치 분산 분석법 (one-way ANOVA) 을 사용하였고, 처리 평균간의 상호 비교는 Tukey 검정을 이용하였다.

3. 결 과

3.1 초장 모델링

콩의 생육 시 초장의 변화를 관찰하기 위하여 파종 20일 후부터 일주일 간격으로 초장을 측정하였다. 초장은 꽃이 피면서부터 꼬투리가 완전히 성숙될 때까지인 생식 생장기까지 급격하게 증가하다가, 이후에는 거의 일정한 값을 보인다 (Table 1). 이후 초장이 계속 증가하다 줄어드는 이유는 수확기가 되었을 때 개체의 수분 함량이 낮아졌기 때문이다. 최대 초장값의 경우 사양지에서 지하수위 20cm와

40cm에 따른 차이가 크게 나타나는 반면에 식양질의 경우 큰 차이를 보이지 않는 것으로 관찰되었다.

증가속도는 사양지에서 지하수위 20cm와 40cm에서 각각 0.099cm/day와 0.096cm/day, 식양질에서는 0.112 cm/day와 0.114 cm/day로 지하수위보다는 토양의 종류에 따라 초장의 증가속도가 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 모델의 중간 값인 사양질과 식양질 모두 지하수위 40cm보다 20cm에서 더 높은 값이 측정되었다 (Table 2). 성장 예측과 관련해 Gompertz 함수와 함께 일반적으로 활용되는 Logistic 함수를 사용하여 비교해보면 성장 시 임계값 (a), 성장률 (k) 등이 비슷하고 Logistic 함수에서도 지하수위보다는 토양의 종류에 따라 초장의 증가속도가 크게 영향을 받는 것으로 알 수 있다. 또한 실제관측치를 어느 정도 대표하여 그 적합성을 측정하는 계수인 결정계수 (R^2)는 두 함수 모두 1에 가까운 값을 보여 매우 높게 나타나고 있으며 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 사용되는 RMSE값은 Gompertz 함수에서 더 높게 나왔다. 이는 Logistic 함수 자체가 성장이 연속적이고 성장이 시작되는 순간부터 성장률에 영향을 준다는 현실적으로 불가능한 가정이 있기에 RMSE값이 더 작게 나온 것으로 예측된다 (Table 3).

Fig. 2와 Fig. 3에는 토성과 지하수위의 상황별로 Gompertz 함수와 Logistic 함수를 사용하여 초장의 측정치와 성장곡선을 나타내었다. 두 성장곡선은 초기에 급속한 성장 이후 서서히 저하되는 모습을 볼 수 있으며 모형간에 큰 차이를 보이지 않았다. Park 등[19]은 Gompertz, Brody, Von Bertalanffy, Logistic 함수를 이용하여 추정한 한우 거세우의 성장곡선에서 Gompertz와 Logistic 함수의 곡선 모형이 유사하다는 연구 결과를 보고하였다. Gompertz와 Logistic 함수에서 콩이 밭토양인 사양질보다 논토양인 식양질에서의 성장률이 더 높은 것은 재배기간 동안 필요한 물의 양이 다른 작물에 비해 많은

작물이기도 하고 밭 재배에 비해 논에서의 물관리가 더 편리하기에 식양지에서 성장률 (k)이 더 높다고 볼 수 있다. 또한 수확기에 수분 함량이 낮아져 초장이 줄어들어 성장 곡선과 데이터 값의 차이가 커져 RMSE 값이 높게 측정되었다.

Table 1. Canopy heights during the growth period

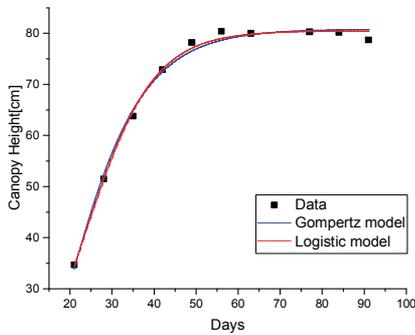
	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
21 day	34.7 ^a	47.8 ^b	53.8 ^b	57.1 ^a
28 day	51.5 ^a	65 ^b	79.1 ^c	81.5 ^{bc}
35 day	63.8 ^a	80.1 ^b	97.4 ^c	95.5 ^{bc}
42 day	72.9 ^a	86.5 ^b	109.6 ^c	105.3 ^c
49 day	78.2 ^a	93.2 ^b	114.8 ^c	108 ^{bc}
56 day	80.4 ^a	94.6 ^{ab}	115.2 ^c	112 ^{bc}
63 day	80 ^a	95.2 ^b	116.6 ^c	112 ^{bc}
77 day	80.3 ^a	95.6 ^b	113.8 ^c	111.6 ^{bc}
84 day	80.2 ^a	95.6 ^b	116.8 ^c	112.3 ^{bc}
91 day	78.6 ^a	94 ^b	113.4 ^c	104.7 ^{bc}

Table 2. Model parameters of canopy height in Gompertz model

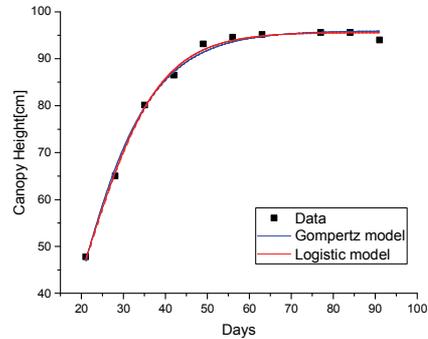
	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
a	80.80 ^a	95.96 ^b	116.21 ^d	110.93 ^c
k	0.099 ^a	0.096 ^a	0.112 ^b	0.114 ^b
x ^c	19.58 ^c	17.50 ^a	18.91 ^b	17.50 ^a
R ²	0.99	0.99	0.99	0.98
RMSE	1.15	1.10	1.76	2.30

Table 3. Model parameters of canopy height in Logistic model

	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
a	80.45 ^a	95.60 ^b	115.85 ^d	110.68 ^c
k	0.122 ^b	0.115 ^a	0.136 ^c	0.134 ^c
x ^c	23.36 ^d	21.15 ^b	22.20 ^c	20.52 ^a
R ²	0.99	0.99	0.99	0.97
RMSE	0.85	0.85	1.39	2.22

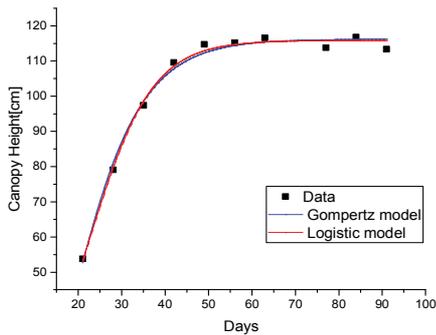


(a)

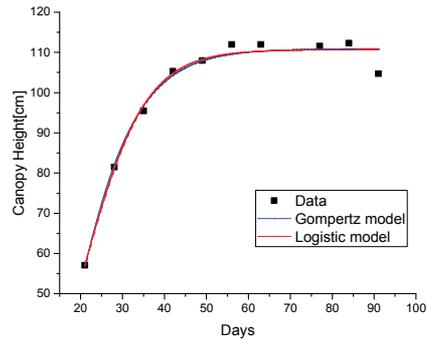


(b)

Fig. 2 Comparison of canopy heights of soybeans in sandy loam at (a) 20cm groundwater level, and (b) 40cm groundwater level



(a)



(b)

Fig. 3 Comparison of canopy heights of soybeans in silt loam at (a) 20cm groundwater level, and (b) 40cm groundwater level

3.2 경태 모델링

경태의 경우에도 초장과 동일하게 파종 20일 후부터 일주일 간격으로 초장을 측정하였다. 경태 또한 생식 성장기까지 급격하게 증가하다가, 이후에는 거의 일정한 값에 수렴한다 (Table 4). 이후 경태의 측정값이 줄어드는 이유는 초장과 동일하게 개체의 수분함량이 낮아지기 때문이다. 경태의

임계값은 같은 토양일 경우 지하수위에 따른 차이가 크게 나타나지 않지만 사양질과 식양질을 비교하였을 때 식양질에서의 임계값이 더 높게 관찰되었다.

증가속도는 사양질에서 지하수위 20cm와 40cm에서 각각 0.061cm/day와 0.069cm/day, 식양질에서는 0.08 cm/day와 0.116 cm/day로 초장과 동일하게 지하수위보다는 토양의 종류에 따라 경태

의 증가속도가 크게 영향을 받는다(Table 5). 또한 Logistic 함수의 임계값 (a), 성장률 (k)은 Gompertz 함수와 비슷하고 Logistic 함수에서도 지하수위의 차이보다는 토성에 따라 경태의 증가속도가 크게 영향을 받는 것으로 알 수 있다. 또한 Gompertz 함수의 경우 결정계수가 0.93~0.98로 매우 높게 나타나고 있으며 Logistic 함수 또한 비

슷한 경향을 나타내고 있으며 RMSE값은 초장모델링에서와 동일하게 Gompertz 함수에서 더 높게 나왔다 (Table 6).

Fig. 4와 Fig. 5에서 Gompertz 함수와 Logistic 함수를 사용하여 토성과 지하수위별로 경태의 측정치와 성장곡선을 비교해보면 그래프의 모양은 거의 비슷하며 초장과 동일하게 초기에 급속한 성장 이후 서서히 저하되는 모습을 볼 수 있다. 콩은 다른 작물에 비해 성장 시 물을 많이 필요로 하기에 식양질에서의 성장률이 더 높으나 논 재배는 배수가 잘 안돼 습해로 인하여 성장에 영향을 끼칠 수 있으므로 배수 관리와 개선이 필요하다.

Table 4. Stem diameter during the growth period

	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
21 day	3.519 ^a	4.252 ^{ab}	5.573 ^c	4.802 ^{bc}
28 day	4.192 ^a	4.826 ^a	6.26 ^b	7.063 ^b
35 day	5.254 ^a	6.586 ^b	7.852 ^{bc}	8.443 ^c
42 day	6.469 ^a	7.011 ^a	8.877 ^b	9.246 ^b
49 day	7.466 ^a	7.018 ^a	9.336 ^b	9.912 ^b
56 day	7.552 ^a	7.594 ^a	9.904 ^b	9.752 ^b
63 day	7.839 ^a	7.799 ^a	9.603 ^a	10.058 ^a
77 day	7.888 ^a	8.277 ^a	9.573 ^a	9.334 ^a
84 day	8.227 ^a	8.03 ^a	9.867 ^a	10.345 ^a
91 day	8.234 ^a	7.871 ^a	9.211 ^a	9.41 ^a

Table 5. Model parameters of stem diameter in Gompertz model

	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
a	8.38 ^b	8.05 ^a	9.77 ^c	9.86 ^c
k	0.061 ^a	0.069 ^b	0.080 ^c	0.116 ^d
x ^c	20.29 ^c	15.39 ^a	15.15 ^a	18.30 ^b
R ²	0.98	0.96	0.93	0.96
RMSE	0.23	0.23	0.33	0.30

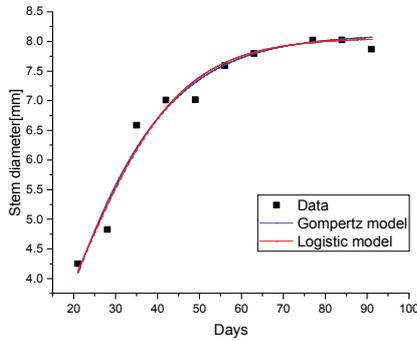
Table 6. Model parameters of stem diameter in Logistic model

	Sandy Loam		Silt Loam	
	20cm	40cm	20cm	40cm
a	8.26 ^b	8.06 ^a	9.74 ^c	9.83 ^d
k	0.080 ^a	0.081 ^a	0.095 ^b	0.139 ^c
x ^c	26.34 ^d	20.41 ^b	19.43 ^a	21.37 ^c
R ²	0.98	0.95	0.94	0.96
RMSE	0.19	0.24	0.30	0.29

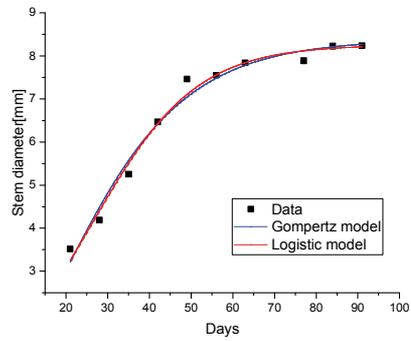
4. 결론

수분을 많이 필요로 하는 발작물인 콩을 논토양에서 재배하기 위해 논으로서 기능을 유지하며 지하수위를 자유롭게 설정할 수 있는 정밀 물관리 기술의 개발이 필요하다. 원통형 라이시미터에 지하수위를 20cm, 40cm로 다르게하고 토양을 식양질과 사양질로 나누어 콩의 생육을 측정하고 시간에 따른 콩의 성장을 Gompertz 함수를 사용해 모델링하였다. 각 성장 환경에 따른 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

라이시미터 설치 후 콩 생육기간 중 초장과 경태는 초기에 급속한 성장을 보이다 수확기에 서서히 저하된다. 생육은 사양질과 식양질 모두 양호하였으나 초장은 토양에 관계없이 지하수위가 20cm보다 40cm일 때 성장 임계값 (a)이 높은 경향을 보였으나 경태는 사양질에서 지하수위가 20cm일 때 성장 임계값 (a)이 더 높았다. 초장과 경태의 성장률 (k)은 지하수위에 관계없이 같은 토양에서는 비슷한 값을 보였다. 토양의 특성에 따라서는

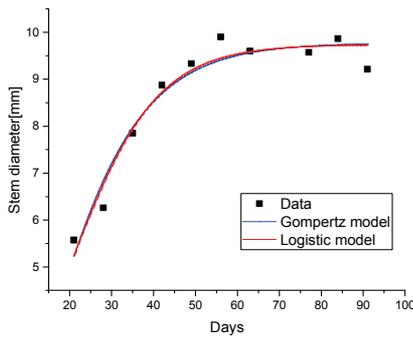


(a)

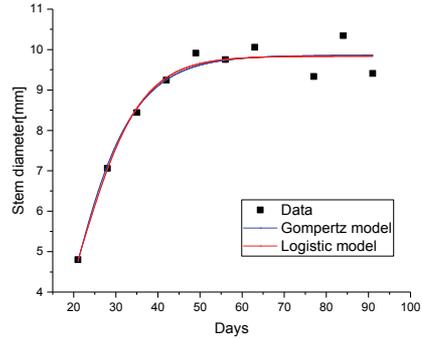


(b)

Fig. 4 Comparison of stem diameters of soybeans in sandy loam at (a) 20cm groundwater level, and (b) 40cm groundwater level



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of stem diameters of soybeans in silt loam at (a) 20cm groundwater level, and (b) 40cm groundwater level

초장과 경태 모두 사양질보다 식양질에서 높은 임계값과 성장률 (k)을 보였다. 또한 Gompertz 모델은 경태와 초장의 성장 모형에 매우 적합한 것으로 나타났다. 이 모델은 콩의 다른 성장 지표의 모형에도 적용될 것으로 기대된다.

전반적으로 콩의 성장을 지하수위와 토양에 따라 비교해 보면 지하수위 보다는 토양에 따라 큰 영향 받는 것을 확인할 수 있었고, 이는 수분함

량이 높은 논 토양인 식양질에서도 콩의 생장이 가능하다고 판단된다. 따라서 본 연구 결과가 논에서 밭작물인 콩을 재배할 때 수분특성에 맞추어 콩을 생산하고 논으로서 기능을 유지하며 지하수위를 자유롭게 설정할 수 있는 정밀 물관리 기술 개발에 유용한 도구로서 역할을 할 것으로 기대한다.

Acknowledgement

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

Reference

- [1] Jung, K.Y., E.S. Yun, C.Y. Park, J.B. Hwang, Y.D. Choi, and K.D. Park. Stress Day Index to Predict Soybean Yield Response by Subsurface Drainage in Poorly Drained Sloping Paddy Fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):702-708, (2011).
- [2] Box, J.E.Jr. The effect of waterlogging on rooting intermittent flooding on germination and seeding growth of cotton. *Trans. ASAE.* 14:567-570, (1991).
- [3] Cannell, R.Q. and M.B. Jackson. Alleviating aeration stress. pp. 141-192. In G.f. Arkin and H.M. Talors (ed) *Modifying the root environment to reduce crop stress.* ASAE. St.Joseph. MI. (1981).
- [4] Plamenac, N. Effects of subsurface drainage on heavy hydromorphic soil in the Nelindvor area, Yugoslavia. *AWM.* 14:19-27, (1988).
- [5] Wesseling, J. Crop growth and wet soils. pp. 39-90. In J. van Schitfgaard (Ed) *Drainage for Agriculture.* Agron. Monogr. 17.ASA. Madison. WI. (1974).
- [6] Seo, M.C., S.O. Hur, Y.K. Sonn, H.S. Cho, W.T. Jeon, M.K Kim, and M.T. Kim. The Development of Estimation Model (AFKAE0.5) for Water Balance and Soil Water Content Using Daily Weather Data. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1203-1210, (2012).
- [7] Yun, E. S., K. Y. Jung, K. D. Park, J. Y. Ko, J. S. Lee, and S. T. Park. Changes in the Soil Physical Properties of Vineyard Converted from Paddy Field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):145-151, (2009).
- [8] Lee, J. E., H. S. Kim, Y. U. Kwon, G. H. Jung, C. K. Lee, H. T. Yun, and C. K. Kim. Changes of Leaf Nitrogen and Petiole Ureide Content in Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] under Waterlogging Condition. *Korean J. Crop Sci.* 56(4):385-393, (2011).
- [9] Kang, B. H. Our country's natural resources. *Korea Studies Information.* (2012).
- [10] Yun, E. S., Y. T. Jung, Y. K. Sonn, S. Y. Hong, B. K. Hyun, G. S. Hyun, C. H. Yoo, and K. Y. Jung. Soil Survey • Classification and Interpretation of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42:5-27, (2009).
- [11] Kim, B. K., H. Y. Gong, J. S. Shim, and S. D. Hong. Water Use Efficiency of Barley, Wheat and Millet Affected by Groundwater Table under Lysimeter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3):253-259, (2010).
- [12] Kim, Y.W. and J.H. Cho. Growth and Yields of Korean Soybean Cultivars in Drained-Paddy Field. *Korea J Crop Sci.* 50(3):161-169, (2005).
- [13] Kim, Y.W. and J.H. Cho. Study on Growth Responses of Soybean in Paddy Field for Establishing Environment-Friendly Cropping System. *Korean J. Organic Agric.* 12(4):437-450, (2004).
- [14] Kang, T. H., H. Li, and H. X. Zhao. A Study on the Growth Models of *Sedum takevimensense* as Affected by Difference of Soil Mixture Ratio in the Green Roof System. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture.* 39(6):110-117, (2011).
- [15] Jung, S.H., S.J. Park, H.H. Chun, and K.B. Song. Original Article: Food Science/Microbiology : Effects of Combined Treatment of Aqueous Chlorine Dioxide and Fumaric Acid on the Microbial Growth in Fresh-cut Paprika. 57(1):83-87, (2014).
- [16] Chun, H. H., S. J. Park, S. H. Jung, and K. B. Song. Predicting and Extending the Shelf Life of Red Cabbage Sprouts. *J Korean Soc Food Sci Nutr.* 42(9):1518-1523, (2013).

- [17] Lu Z. X., Lu F.X., Zhang L.K., Bie X.M., and Zou X.K. Predictive modeling and growth models of aerobic mesophilic bacteria on fresh-cut lettuce by hypochlorite-washing. *J Food Safety*. 27(2):157-168, (2007).
- [18] Jahng, S. M. and S. Y. Pae. A Comparison of Estimation Procedures for Quantile Logistic Growth Curves. *Korean Journal of Psychology : General*. 33(4):929-951, (2014).
- [19] Park, H. R., S. H. Eum, S. H. Roh, D. W. Sun, J. K. Seo, S. K. Cho, J. G. Lee, and B. W. Kim. Growth curve estimates for wither height, hip height, and body length of Hanwoo steers(*Bos Taurus coreanae*). *KJOAS*. 44(3): 384-391, (2017).

(접수: 2017.10.24. 수정: 2017.11.22. 게재확정: 2017.11.29.)