

마늘의 생육자료와 기상자료 기반으로 다층모형을 이용한 수확기 구중 추정

최성천 · 김준기 · 서홍석*

한국농촌경제연구원 농업관측센터

Estimation of Garlic's Bulb Weight at Harvest Using a Multi-level Model Based on Growth and Meteorological Data

Seong Cheon Choi, Jun Ki Kim, and Hong Seok Seo*

Center for Agricultural Outlook, Korea Rural Economic Institute, Naju 58321, Korea

*Corresponding author: hongseokseo@krei.re.kr

Abstract

There is a large fluctuation in the production and price of garlic (*Allium sativum* L.) because it is grown mainly in the open field and is vulnerable to weather conditions. Accurate forecasting is needed to manage production. The purpose of this study was to improve the accuracy of production forecasting by developing a model that estimates the weight of garlic bulbs at harvest based on growth and meteorological data. For this study, a two-level multilevel model was used to reflect the hierarchical data characteristics consisting of individual unit data that represented the above-ground growth conditions at the end of April and the lot unit data that represented the meteorological conditions from the end of April to harvest time. It was determined that the weight of the garlic bulb increased as the growth of the sheath diameter and the plant height increased at the end of April. As for the meteorological factors, it was estimated that precipitation had negative effects on the garlic bulb weight, while the pre-harvest precipitation, duration of sunshine, evapotranspiration, and the optimal temperature days had positive effects on the weight.

Additional key words: *Allium sativum* L., fixed effect, growth observation survey, hierarchical data, supply-demand management

서 언

마늘(*Allium sativum* L.)은 주요 5대 채소 품목 중 하나로, 주로 노지에서 재배되어 기상에 따라 생육작황 변동성이 크기 때문에 생산량과 가격의 불안정성이 크다. 안정된 수급관리를 위하여 정부에서는 다양한 수급조절 정책을 마련하지만, 적절한 정책을 실현하기 위해서는 정확한 수요량과 생산량 예측이 선제적으로 이루어져야 한다.

마늘 생산량 예측과 생육에 영향을 미치는 환경요인 탐색 등 다양한 연구가 진행되어 왔다. 마늘 주산지

Received: September 10, 2020

Revised: March 31, 2021

Accepted: May 10, 2021

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY
39(4):521-529, 2021
URL: <http://www.hst-j.org>

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright©2021 Korean Society for Horticultural Science.

의 단수정보와 기상자료를 활용하여 패널회귀모형으로 단수를 추정한 결과 1월 평균최고기온, 3월 누적강수량, 10월 누적강수량, 4월 누적일조시간, 10월 누적일조시간 등이 마늘 단수에 유의한 기상요인으로 확인되었다(Choi and Baek, 2016a). 마늘과 양파의 주산지를 대상으로 시계열 MODIS NDVI와 기상요인을 이용하여 단수에측모형을 연구한 결과 생육단계 중 잎출현기(leaf emergence) 초반의 NDVI와 단수가 높은 상관성을 나타냄을 확인하였다(Na et al., 2017). 또한 난지형 마늘의 적합한 재배온도의 범위로 주간 17°C, 야간 12°C 조건에서 유지하는 것이 크기와 모양이 균일한 인경과 인편을 가지는 상품성 높은 마늘을 생산할 수 있음을 확인하였다(Oh et al., 2019).

마늘과 유사한 작물인 양파의 경우에도 다양한 연구 사례가 있다. 일장을 조절하며 양파 구 비대에 미치는 영향력을 분석한 연구(An and Suh, 2013)가 있었으며, 양파 주산지의 단수와 기상자료를 활용하여 공간가중패널회귀모형을 통해 단수를 추정하는 연구(Choi and Baek, 2016b)가 있었다. 또한, 생육기 온도 상승이 극조생 양파의 생육과 구 비대에 미치는 영향 검증(Song et al., 2017), 고온과 다습조건이 양파 생육 및 수량에 미치는 영향력 규명(Lee et al., 2019), 양파 구 특성 및 유기물 함량 등에 따른 품종 평가 및 분류(Lee et al., 2020) 등의 연구도 수행되었다.

그러나 위의 선행연구들은 최종단수에 영향을 미치는 기상요인을 확인하거나, 관심있는 환경요인을 통제하는 실험을 통하여 마늘 생육의 변화 양상을 확인하는 연구였기 때문에 노지에서 재배되는 마늘의 생육환경 변동성을 고려하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 한국농촌경제연구원(KREI)에서 실시한 실측조사 자료 중 지상부 생육자료와 국립농업과학원에서 제공한 기상자료 추정치를 토대로 난지형 마늘의 최종 구중을 추정하는 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

생육 실측조사 자료 및 소기후모형의 기상 추정 자료

분석에 사용된 자료는 생육 실측조사 자료(이하 생육자료)와 소기후모형의 기상 추정 자료(이하 기상자료)를 사용하였다. 생육자료는 2020년 KREI에서 실시한 생육 작황 실측조사 결과를 활용하였으며, 실측 조사대상 100농가 중 병해발생, 표본교체, 측정불가 등을 제외한 난지형(남도, 대서) 마늘(*Allium sativum* L.)을 재배하는 25농가의 실측자료를 사용하였다. 생육 실측조사는 2020년 2월 15일부터 6월 11일까지 총 11회를 실시하였으며, 이 중 구 비대시점인 4월 하순(6회차 조사)의 지상부 생육자료(초장, 엽초경, 엽수, 엽초장)와 최종수확기의 생구무게 자료를 사용하였다. 마늘의 T/R율(지상부와 지하부 생장의 중량비율), 엽수 및 엽초경이 수확기 약 30일 전 전후로 최대치를 나타냈다가 줄어드는 경향을 보이므로(Chungcheongbuk-do ARES, 2014) 구의 비대가 빠르게 진행되는 4월 하순을 마늘 구중의 결정요인 추정 시점으로 설정하였다. KREI에서 실시한 2020년 생육 실측조사와 관련된 조사체계 및 조사 항목, 조사주기, 조사 결과 자료 등 자세한 사항은 농업관측 통계정보시스템에서 확인할 수 있다(OASIS, 2020).

기상자료는 기상청 기상데이터포털에서 종관기상관측(ASOS) 자료를 얻을 수 있으나, 최소 단위가 시군으로 구성되어 있어, 필지 단위로 구축된 생육자료와 연관성이 낮은 한계점이 있다. 이를 보완하기 위하여 국립농업과학원에서 제공한 필지단위의 일별 기상 추정치 자료를 사용하였다. 기상 추정에 사용된 소기후 모형은 우리나라 전역의 필지 단위까지 기상자료를 추정하는 모형으로 중요한 기상요소를 중심으로 개발하였다(Kim et al., 2019).

기상요소별 상세화 기술로, 기온은 관측소별 관측값을 IDW(Inverse Distance Weighting) 방법으로 공간내삽한 후 동적 해발고도 보정, 일사효과, 도시열섬효과, 온난대 보정, 냉기류 보정을 적용한 기술이다. 강수량은 PRISM(Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model) 모형을 이용하였으며, 일조시간은 시간별 음영기복도를 이용하여 추정하였다. 일사량은 관측소별 일적산일사량 관측값을 IDW 방법으로 공간내삽한 후 수평면 일사량의 지형보정치인 상대일사량지수 분포도(PRR, Potential Relative Radiation)를 이용하여 보정한 기술이다(RDA, 2018a).

소기후 모형을 통해 산출된 필지단위의 일별 기상자료(최고기온, 최저기온, 평균기온, 일조시간, 강수량, 일사량) 외에 선행 연구와 문헌을 참고하여 마늘 구중에 영향을 미칠 수 있는 9가지 기상 파생변수를 생성하였다. 파생변수 종류로는 증발산량(지면에서 대기로 증발한 수증기량과 식물의 잎 표면에서 대기로 증산된 수분량의 합), 생육도일(평균기온이 4°C 이상인 일별 [일 평균기온-4] 값의 합), 최적기온일수(최고기온이 15-25°C인 일수), 일교차(최고기온-최저기온의 평균), 고온일수(최고기온 30°C 이상인 일수), 강우일수(일강수량이 5mm 이상인 일수), 강우피해지수(전날 강수량과의 합이 50mm 이상이 되는 날의 일강수량 합), 탄소동화작용지수(최고기온이 25°C 이상인 일수), 수확직전 강수량(수확일 전 이틀간의 누적 강수량)이다. 구비대시점인 4월 하순부터 최종 수확기까지의 기상이 마늘 생육에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 기상자료 특성에 따라 누적 또는 평균값으로 변환하여 분석에 활용하였다.

통계모형

구축된 자료의 특성은 생육자료가 개체단위로 축적되어 있고 기상자료는 필지단위로 축적되어 있어 생육자료와 기상자료는 위계적 자료(Hierarchical Data)의 구조(Fig. 1)를 가지고 있다. 다중회귀분석과 같이 기존의 통계모형은 단층구조의 자료로서 하나의 분석단위만을 고려한다. 하지만 본 연구에서 사용하는 자료는 1-수준인 개체단위, 2-수준인 필지단위로 구성되어 복수의 분석단위를 가진다. 이러한 위계적 자료를 개체 단위로 분석하게 될 경우 동일 필지 내 개체간 상관성 등의 이유로 독립성의 가정이 위배되며, 표준오차의 과소 추정, 1종 오류(type I error)의 증가, 가설검정의 타당성 위협 등이 발생한다(Cronbach, 1976).

반면에 필지단위로 분석하는 경우 분석단위의 독립성 가정이 충족되므로 가설검정의 타당성 위협은 줄어든다. 하지만 표본 크기가 줄어들어 추정량의 정밀도와 분석결과의 신뢰도는 저하되며, 필지 수준의 변수만 분석에 활용하기 때문에 모든 해석이 필지 특성으로만 해석되어야 한다. 만약 집단의 정보로 개인을 해석하면 생태학적 오류(ecological fallacy)를 범할 수 있다(Robinson, 1950). 따라서, 생육과 기상자료가 보유한 특성을 같이 고려하여 마늘의 최종 구중을 추정하기 위해 2-수준 다층모형(multi-level model)을 활용하였다.

구중 추정모형의 변수 선택과정으로, 먼저 1-수준 요인인 생육변수만을 활용하여 구중 모형을 추정한 결과 엽수, 초장, 엽초경이 주요한 요인으로 확인되었다. 이를 포함하여 다음 2-수준 요인인 기상변수 중 강수량, 강우일수, 수확직전 강수량, 일조시간, 증발산량, 최적기온일수가 구중에 영향을 미치는 주요한 요인으로 확인되어 최종모형에 적용하였다.

1-수준 모형은(Eq. 1) 생육 자료의 개체 단위 모형으로, 최종 구중과 개체별 생육자료와의 회귀분석 모형이다. Y_{ij} 는 j 농가에 속한 i 개체의 최종 구중이며, x_{ij} 는 각 개체별 생육자료(엽수, 초장, 엽초경)이다. β_{ij} 는 j 농가의 1번째 생육 변수(x_{1ij})가 종속변수 Y_{ij} 에 미치는 한계효과를 추정하고자 하는 모수이다. e_{ij} 는 오차항으로 정규분포를 따른다. 초장이 최종 구중에 미치는 영향이 농가에 따라 다른 것처럼, 계수 β_j 는 필지의 특성에 따라 값이 다를 수 있다. 따라서 2-수준 모형은(Eq. 2) 필지간의 차이

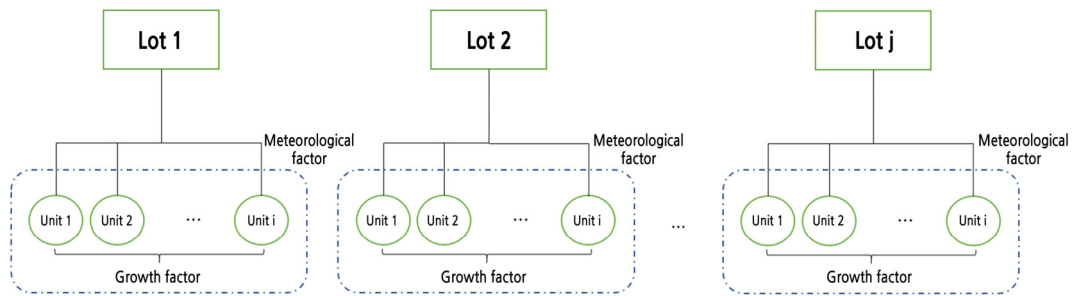


Fig. 1. Garlic in the same lot were collected as individual units. The units have a two-level hierarchical structure that shares meteorological factors. One-level represents growth factors at the unit level, and Two-level represents meteorological factors at the lot level.

를 설명하는 모형으로 집단간 모형이기도 하다. W_j 는 최종 구중에 영향을 미치는 필지별 기상자료를 나타내며, γ_{01} 은 1번째 기상변수가 최종 구중에 미치는 한계효과를 나타내는 모수이다.

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}(X_{1ij} - \bar{X}_{1ij}) + \beta_{2j}(X_{2ij} - \bar{X}_{2ij}) + \beta_{3j}(X_{3ij} - \bar{X}_{3ij}) + e_{ij}, e_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}(W_{1j} - \bar{W}_{1.}) + \gamma_{02}(W_{2j} - \bar{W}_{2.}) + \gamma_{03}(W_{3j} - \bar{W}_{3.}) + \gamma_{04}(W_{4j} - \bar{W}_{4.}) + \gamma_{05}(W_{5j} - \bar{W}_{5.}) + \gamma_{06}(W_{6j} - \bar{W}_{6.}) + u_{0j}, \quad (2)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + u_{1j}, \beta_{2j} = \gamma_{20}, \beta_{3j} = \gamma_{30}, \text{ where } \begin{bmatrix} u_{0j} \\ u_{1j} \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \tau_{00}, & \tau_{01} \\ \tau_{10}, & \tau_{11} \end{bmatrix} \right)$$

1-수준 변수의 중심화 변환에서는 집단평균 중심화 ($X_{ij} - \bar{X}_{.j}$) 변환을 사용하였는데, 중심화 변환 방법 중 집단별 회귀선의 신뢰도가 가장 높고 1-수준 오차도 가장 작다는 장점을 활용하고자 하였다(Kang, 2016).

통계분석 결과 고정효과 모수 추정치와 랜덤효과(또는 무선효과) 모수 추정치를 확인할 수 있다. 고정효과는 절편계수(γ_{00})와 수준별 변수의 계수($\gamma_{01} \sim \gamma_{06}, \gamma_{10} \sim \gamma_{30}$)이며 그 의미는 모집단 전체 평균(γ_{00})과 생육변수(또는 기상변수)가 한 단위 증가할 때 최종 구중에 미치는 한계효과를 의미한다. 랜덤효과는 개체별 효과인 e_{ij} 와 필지별 효과인 u_{0j}, u_{1j} 가 있다. 랜덤효과는 생육요인이나 기상요인이 최종 구중에 미치는 영향력의 정도가 고정된 효과 이외에 필지별로 다른 효과가 적용될 수 있음을 나타내는 정도로서 분포의 형태를 가지고 있다. 1-수준 모형의 랜덤효과 모수인 σ^2 은 e_{ij} 의 분산을 의미하며, 2-수준 모형의 랜덤효과 모수인 τ 는 u_{0j}, u_{1j} 의 분산-공분산 행렬을 의미한다.

모수 추정으로 최대우도 추정법(Maximum Likelihood, ML)을 이용하였으며, 모형의 적합성은 AIC(Akaike Information Criterion)와 BIC(Bayesian Information Criterion)값을 기준으로 최적 모형을 선택하였다.

결과 및 고찰

Fig. 2는 1차부터 10차 조사까지 지상부의 생육 변화를 보여주는 꺾은선 그래프이다. 초장, 엽수, 엽초경은 6-7차 조사(4월 하순-5월 상순)를 중심으로 점차 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, 특히 초장의 경우 변화폭이 크게 나타났다. 엽초장의

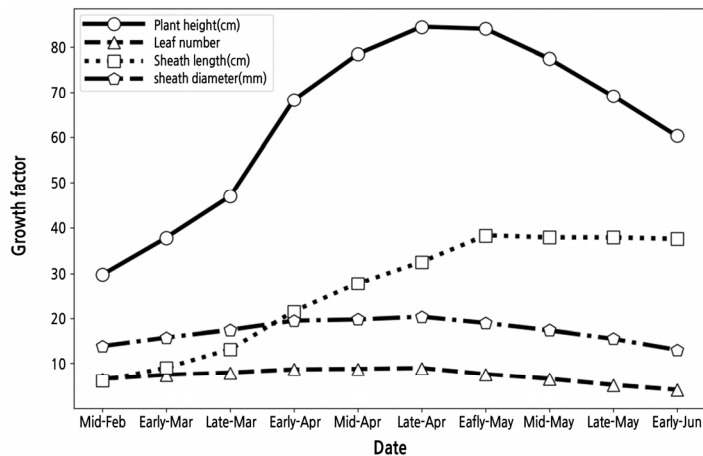


Fig. 2. A line graph showing the changes in the above-ground growth from the 1st (Mid-Feb) to the 10th (Early-Jun) survey of 25 garlic cultivation farms. Circles, triangles, squares, and pentagons refer to the growth data of plant height, leaf number, sheath length, and sheath diameter, respectively.

경우 7차 조사(5월 상순) 이전까지 점차 증가하다 유지되는 경향을 보였다. Table 1은 6차 조사(4월 하순) 기준 지상부 생육자료와 최종수확기 구중 무게의 기초통계량이다. 구비대 초기의 지상부 생육은 평균적으로 초장 84.95cm, 엽수 8.97매, 옆초장 32.67cm, 옆초경 20.32mm 이었으며, 수확기 평균 구중은 77.03g 이었다.

또한, 실측 조사 농가 필지별 추정한 기상 자료의 기초통계분석을 실시하였다. 분석 대상 기간은 생육조사 측정일과 동일한 구비대시점인 4월 하순부터 최종 수확기까지 약 30일간으로 설정하였다. Fig. 3은 표본 대상 농가의 기상자료(최고기온, 최저기온, 평균기온, 일조시간, 강수량, 일사량) 누적 또는 평균값의 상자그림을 보여준다. 예를 들어 평균기온(Avg. Temp.)은 25 농가의 약 30일간의 평균기온 분포를 보여준다. Table 2는 최종 분석모형에 선택된 기상요인의 기초통계분석 결과이다.

난지형 마늘의 생육자료와 기상자료를 활용하여 최종 구중을 추정하는 2-수준 다층모형 분석결과는 Table 3에 정리하였으며, 마늘의 최종 구중을 추정하는 모형식은 다음과 같다.

$$Y_{ij} = 76.26 - 0.20(W_{1j} - \bar{W}_{1.}) - 7.22(W_{2j} - \bar{W}_{2.}) + 0.50(W_{3j} - \bar{W}_{3.}) + 42.04(W_{4j} - \bar{W}_{4.}) + 76.46(W_{5j} - \bar{W}_{5.}) + 6.73(W_{6j} - \bar{W}_{6.}) + 3.12(X_{1ij} - \bar{X}_{1ij}) + 1.61(X_{2ij} - \bar{X}_{2.ij}) + 0.58(X_{3ij} - \bar{X}_{3.ij}),$$

where $W_1 =$ Precipitation, $W_2 =$ Rainy days, $W_3 =$ Pre-harvest Precipitation, $W_4 =$ Daylight hours, $W_5 =$ Evapotranspiration, $W_6 =$ Optimal temperature days, $X_1 =$ Sheath diameter, $X_2 =$ Leaf number, $X_3 =$ Plant height

Table 1. Basic statistics on the above-ground growth data at the end of April and the bulb weight at harvest time

Time	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
6th survey (end of April)				
Plant height (cm)	84.95	11.20	34.70	109.40
Leaf number	8.97	1.27	6.00	13.00
Sheath length (cm)	32.67	6.72	11.40	52.30
Sheath diameter (mm)	20.32	3.59	9.98	30.65
Final survey (harvest time)				
Bulb weight (g)	77.03	28.72	15.00	156.00

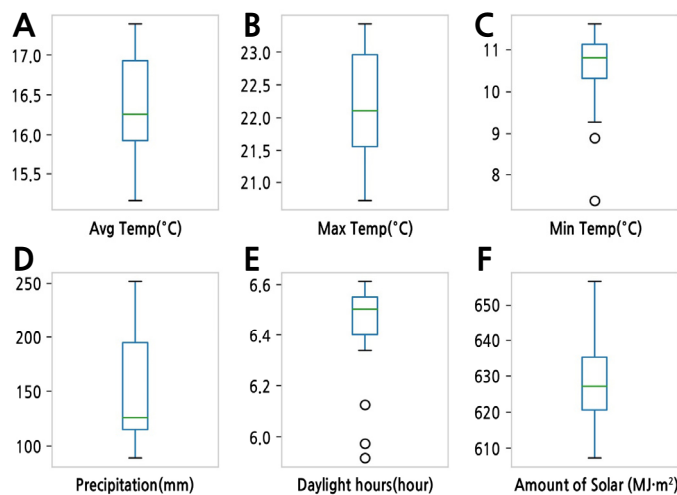


Fig. 3. Box plot of cumulative or average values of meteorological data from the end of April to harvest, (A) daily mean air temperature, (B) daily maximum air temperature, (C) daily minimum air temperature, (D) cumulative precipitation, (E) daylight hours, (F) cumulative amount of solar.

Table 2. Basic statistics of meteorological data from the end of April to harvest time of 25 farms in the main garlic production regions

Meteorological factors ^z	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Precipitation	153.76	56.35	88.70	251.43
Rainy days ^y	6.64	1.19	4.00	9.00
Pre-harvest precipitation ^x	4.30	5.80	0.00	16.65
Daylight hours	6.44	0.18	5.92	6.61
Evapotranspiration	3.56	0.16	3.33	3.90
Optimal temperature days ^w	7.76	1.94	5.00	11.00

^zUsing data from the National Institute of Agricultural Sciences.

^yThe number of days with more than 5mm of daily precipitation.

^xCumulative precipitation in the two days before harvest.

^wThe number of days with the maximum air temperature between 15°C and 25°C.

본 연구의 주요 목적은 생육요인과 기상요인이 마늘의 최종 구중에 미치는 영향을 추정하는 것이기 때문에 고정효과 추정치를 중심으로 분석결과를 정리하였다. 1-수준 모형의 고정효과 추정치 중 마늘 최종 구중의 평균값($\hat{\gamma}_{00}$)은 76.26g으로 추정되었다. 엽초경의 한계효과($\hat{\gamma}_{10}$)는 3.12로 추정되었으며, 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 4월 하순 마늘 엽초경이 1mm 증가하면 최종 구중은 3.12g 증가하는 것으로 분석되었다. 엽수의 한계효과($\hat{\gamma}_{20}$)는 1.61로 추정되었으나, *p*-value는 0.126으로 통계적으로 유의하지 않았다. 초장의 한계효과($\hat{\gamma}_{30}$)는 0.58로 추정되었으며, 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 구비대 초기에 초장이 1cm 증가하면 최종 구중은 0.58g만큼 증가하는 것으로 분석되었다.

기상요인으로는 강수량, 강우일수, 수확직전 강수량, 일조시간, 증발산량, 최적기온일수 총 6가지 기상변수가 최종모형에 선택되었다. 강수량의 한계효과($\hat{\gamma}_{01}$)는 -0.20, 강우일수의 한계효과($\hat{\gamma}_{02}$)는 -7.22로 두 추정치 모두 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 구비대 초기부터 수확기 기간동안 강수량이 1mm 증가하면 최종 구중은 0.20g 감소하고, 강우일수가 하루 증가하면 7.22g 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 구비대 초기 이후부터 최종 수확시점까지 약 30여일간의 강수량과 강우일수가 증가할수록 상대습도가 높아져 구의 성장에 부정적인 영향을 미친다고 해석될 수 있다. 이는 고온과 다습 조건이 결합되면 쪽당 무게가 감소하고 생리장해 발생 및 스펀지마늘 등 비상품과의 발생률이 증가하여 상품수량이 감소한다는 선행연구 결과(Lee et al., 2018)와 유사하다. 수확직전 강수량의 한계효과($\hat{\gamma}_{03}$)는 0.50으로 10% 수준에서 통계적으로 유의하였으며, 증발산량의 한계효과($\hat{\gamma}_{05}$)는 76.46으로 1% 수준에서 통계적으로 유의하게 추정되었다. 수확일 전 이틀간의 강수량이 1mm 증가하면 최종 구중은 0.50g 증가하고, 증발산량이 1단위 증가하면 76.46g 증가하는 것으로 분석되었다. 일조시간의 한계효과($\hat{\gamma}_{04}$)는 42.04, 최적기온일수의 한계효과($\hat{\gamma}_{06}$)는 6.73으로 두 추정치 모두 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 구비대 초기부터 수확기까지 일조시간이 1시간 증가하면 최종 구중은 42.04g 증가하고, 최고기온이 15°C 이상 25°C 이하인 일수가 하루 증가하면 6.73g 증가하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 마늘쪽 비대 조건은 온난장일(적은 조건은 20°C 내외)이며, 구 비대시기인 5월의 단일은 구형성에 극히 불량하게 나타나는 반면, 자연일장과 장일은 구 비대를 촉진시키는 것으로 보고된 결과(RDA, 2018b)와 유사하다.

최종 마늘 구중 추정 모형의 예측력을 확인하기 위해 모형의 성능지표로 RMSE(Root mean square error), MAE(Mean absolute error), MAPE(Mean absolute percentage error)를 산출하여 Table 3에 제시하였다. 추가로 실제 마늘 구중(x축)과 모형 추정 구중(y축)의 산점도를 Fig. 4에 나타냈다. 대부분의 개체에서 실제 구중과 추정 구중이 $y = x$ 선에 근접하게 분포하고 있으며 두 수치간 상관계수도 0.83으로 높아, 다층모형의 추정결과는 마늘의 최종 생구무게를 예측하는데 강건하다고 판단된다.

구비대 초기의 생육자료와 구비대 초기부터 수확기 기간 동안의 기상자료를 활용하여 마늘의 최종 구중에 미치는 주요 요인

Table 3. Two-level multi-level model analysis results that estimate the final garlic (*Allium sativum* L.) bulb weight using above-ground growth data and meteorological data

Fixed effects ^z	Estimate	Standard error	T-statistic	P-value ^y
1-Level effect				
Intercept (γ_{00})	76.26	1.73	44.16	0.000***
Sheath diameter (γ_{10})	3.12	0.56	5.57	0.000***
Leaf number (γ_{20})	1.61	1.05	1.53	0.126
Plant height (γ_{30})	0.58	0.13	4.38	0.000***
2-Level effect				
Precipitation (γ_{01})	-0.20	0.02	-7.87	0.000***
Rainy days (γ_{02})	-7.22	1.56	-4.63	0.000***
Pre-harvest precipitation (γ_{03})	0.50	0.27	1.90	0.063
Daylight hours (γ_{04})	42.04	9.17	4.59	0.000***
Evapotranspiration (γ_{05})	76.46	11.45	6.68	0.000***
Optimal temperature days (γ_{06})	6.73	1.07	6.26	0.000***
Random effects ^x	Variance	Standard deviation		
1-Level effect				
Residual (e_{ij})	266.910	16.337		
2-Level effect				
Intercept (u_{0j})	55.275	7.435		
Sheath diameter (u_{1j})	4.787	2.188		
RMSE	MAE	MAPE		
15.84	12.2	18.69		

^zThe results of fixed effects such as estimates, standard errors, *t*-statistics, and *p*-values of above-ground growth factors and meteorological factors.

^y*, ** and *** indicate statistical significances at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

^xThe results of random effects such as variances and standard deviations of residual, intercept, and sheath diameter factors.

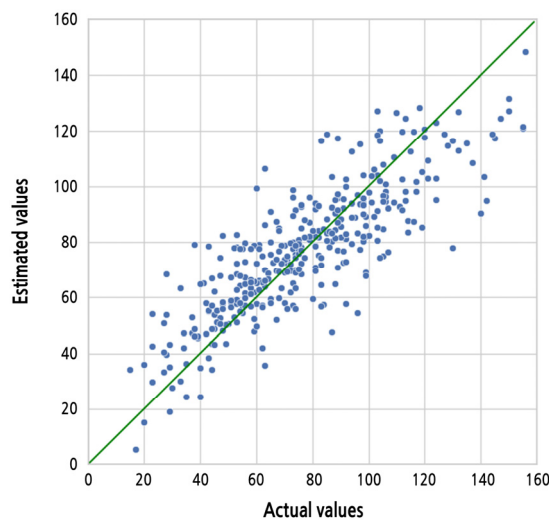


Fig. 4. Scatter plot comparing estimated and actual values of final garlic bulb weights. Y-axis is the estimated values from the multilevel model and X-axis is the actual values, and the solid line is the $Y = X$ line.

을 확인하고 효과를 추정하였다. 4월 하순 초장과 엽초경의 생육이 좋을수록 마늘의 최종 구중이 증가하는 것으로 분석되었으며, 기상요인 중에서는 강수량과 강우일수는 구중에 부정적인 영향을 미치는 반면, 수확직전 강수량, 일조시간, 증발산량, 최적기온일수는 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 단층 구조의 전통적인 통계모형이 아닌 위계적 자료의 특성을 반영할 수 있는 다층모형으로 마늘 구중을 추정하였으며, 수확기 약 30일 이전의 지상부 생육자료를 기반으로 최종 구중을 추정할 수 있는 방안을 모색하였다는 점에서 향후 수급안정 정책의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 주요 한계는 병해충, 토양정보, 경영정보 등 기상요인이나 지상부 생육요인 외에 구중 성장에 영향을 미칠 수 있는 다양한 환경요인을 통제하지 않았다는 점이다. 또한, 생육 실측자료가 1개년만 수집되어 있어 본 연구에서 추정한 모형을 비교 검증할 수 없었다. 향후 지속적으로 축적한 생육자료를 토대로 본 연구에서 구축한 추정모형을 검증하고 모형의 개선연구를 수행한다면 보다 신뢰도 높은 추정결과를 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후 실측조사에서는 생육정보 뿐만 아니라 병해충, 토양정보, 경영정보 등 다양한 생육환경 자료를 수집하여 마늘 최종 구중 예측모형의 고도화 연구를 위한 기초자료가 구축되길 기대한다.

초 록

마늘은 노지 작물로 기상에 따라 작황 변동성이 크기 때문에 생산량과 가격의 불안정성이 크다. 안정된 수급관리를 위하여 정확한 생산량 예측이 선제적으로 이루어져야 한다. 본 연구는 구 비대 초기의 마늘 생육과 기상자료를 기반으로 구중 추정모형을 개발함으로써 생산량 예측의 정확도 개선을 도모하였다. 분석은 개체단위인 4월 하순 지상부 생육자료와 필지단위인 4월 하순에서 수확기까지 기상 추정자료로 구성된 위계적자료 특성을 반영하여 2-수준 다층모형을 활용하였다. 분석결과 4월 하순 엽초경, 초장의 생육이 좋을수록 생구 무게가 증가하는 것으로 나타났다. 기상은 강수량, 강우일수는 구중에 감소효과를, 수확직전 강수량, 일조시간, 증발산량, 최적기온일수는 증가효과가 나타나 마늘 최종 구중에 유의한 요인으로 확인되었다.

추가 주요어 : 마늘, 고정효과, 생육실측조사, 위계적자료, 수급관리

Literature Cited

- An SR, Suh JK (2013) Effect of Different Day Length on the Production of Onion (*Allium cepa* L.) Set. Protected Hortic Plant Fac 22:43-47. doi:10.12791/KSBEC.2013.22.1.043
- Choi SC, Baek JS (2016a) Garlic yields estimation using climate data. Korean Data Inf Sci Soc 27:969-977. doi:10.7465/jkdi.2016.27.4.969
- Choi SC, Baek JS (2016b) Onion yield estimation using spatial panel regression model. Korean J Appl Stat 29:873-885. doi:10.5351/KJAS.2016.29.5.873
- Chungcheongbuk-do Agricultural Research and Extension Service (Chungcheongbuk-do ARES) (2014) Investigation of changes in garlic biological season/development of stable garlic production and quality improvement. Chungcheongbuk-do ARES, Cheongju, Korea
- Cronbach LJ (1976) Multivariate considerations. // Research on classrooms and schools: Formulation of questions, design, and analysis. Unpublished manuscript, Stanford, CA: Stanford University, Stanford Evaluation Consortium, pp 196-224
- Kang SJ (2016) Multilevel models. Hakjisa, Korea
- Kim DJ, Kim SO, Kim JH, Yun EJ (2019) Establishment of Geospatial Schemes Based on Topo-Climatology for Farm-Specific Agrometeorological Information. Korean J Agric For Meteorol 21:146-157
- Lee HJ, Lee SG, Kim SK, An SW, Lee JH, Lee HS, Kim CW, Kwon YS, Han JW (2019) Effects of High-Temperature and Soil Moisture Conditions on the Physiological Response of Onion. Korean J Hortic Sci Technol 37:571-578
- Lee HJ, Lee SG, Kim SK, Mun BH, Lee JH, Lee HS, Kwon YS, Han JW, Kim CW (2018) Effects of Combination of Air Temperature and Soil Moisture Contents on Growth, Clove Initiation, Physiological Disorders, and Yield of Garlic. Protected Hortic Plant Fac 27:191-198. doi:10.12791/KSBEC.2018.27.3.191
- Lee J, Kim J, Kwon J-H, Chang Y-H, Kwon Y-S, Kim T-J, Park M-J, Kim M-A, Lee H-M (2020) Evaluation of Forty-five Cultivars as Affected by Bulb Initiation, Bulb and Scale Characteristics, and Bulb Minerals and Organic Compounds of Intermediate-Day Yellow Onion

- (*Allium cepa* L.) in South Korea. Horticult Environ Biotechnol 61:1011-1029. doi:10.1007/s13580-020-00282-2
- Na SI, Park CW, So KH, Park JM, Lee KD** (2017) Development of Garlic & Onion Yield Prediction Model on Major Cultivation Regions Considering MODIS NDVI and Meteorological Elements. Korean J Remote Sens 33:647-659
- Oh SY, Moom KH, Song EY, Koh SC** (2019) Photosynthesis, Growth, and Clove Formation of Southern-type Garlic in Response to Different Day/Night Temperature Regimes. Korean J Horticult Sci Technol 37:696-707
- Outlook & Agricultural Statistics Information System (OASIS)** (2020) <http://oasis.krei.re.kr/index.do>. Accessed 31 August 2020
- Robinson WS** (1950) Ecological Correlations and Behavior of Individuals. Am Sociol Rev 15:351-357. doi:10.1093/ije/dyn357
- Rural Development Administration (RDA)** (2018a) Assessment for climate change in agriculture. RDA, Jeonju, Korea
- Rural Development Administration (RDA)** (2018b) Garlic cultivation. RDA, Jeonju, Korea
- Song EY, Moon KH, Wi SH, Kim CH, Lim CK, Oh SJ, Son IC** (2017) Impact of Elevated Temperature in Growing Season on Growth and Bulb Development of Extremely Early-Maturing Onion (*Allium cepa* L. cv. Singsingball). Korean J Agric For Meteorol 19:223-231