

생육 지표와 기상 정보를 이용한 중만생종 양파 구중 예측*

김지수** 김선웅***

Key words

양파(Onion), 생육 지표(Growth indicators), 기상 정보(Meteorological factors), 다층모형(Multilevel model), 구중 예측(Forecasting Bulb Weight)

ABSTRACT

This study develops a forecasting model for bulb weight of median-late variety onion to alleviate supply-demand imbalance. The actual measurement data in 2020/2021 are from the Korea Rural Economic Institute (KREI). A multilevel model is applied to reflect the hierarchical data characteristics consisting of growth indicators in individual units and meteorological factors in parcel units. The results are as the following:

The harvest timing should be considered when constructing the forecasting model since the weights vary depending on that. The growth indicators, especially the number of leaves, at the early bulb enlargement period and the number of optimum temperature days during the bulb enlargement period show the positive effects on the bulb weight at the harvest. It is possible to forecast the growth indicators at the early bulb enlargement period using those at the early leaf elongation period. When applying the estimation results for 2020 and 2021 data, the growth indicators at the early bulb enlargement period can be explained as much as about 90% based on those at the early leaf elongation period.

차례

- | | |
|----------|------------|
| 1. 서론 | 4. 분석 결과 |
| 2. 분석 모형 | 5. 요약 및 결론 |
| 3. 분석 자료 | |

* 본 논문은 농림축산식품부와 한국농촌경제연구원에서 공동 주최/주관하는 ‘2020년 제1회 농산물 수급 예측모형 경진대회’에서 수상작으로 선정된 논문을 수정 보완한 것임.

** 충북대학교 농업경제학과 석사과정

*** 충북대학교 농업경제학과 교수, 교신저자. e-mail: seonwoong@cbnu.ac.kr

1. 서론

양파는 우리나라의 대표적인 양념채소 중 하나로, 주된 수확시기는 5월 말부터 6월 중순이며 저장 등을 통해 연중 꾸준히 소비된다. 더하여 연도별 소비량 역시 큰 변화 없이 안정적인 것으로 조사되고 있다. 예컨대 2010년 1인당 연간 양파 소비량은 약 28.6kg으로, 2020년에는 약 30kg 이내로 안정적인 소비세를 유지하고 있다(한국농촌경제연구원 2021). 그러나 양파 생산량은 연도별로 큰 편차를 나타내고 있다. 실제로 통계청 농작물생산조사 자료에 따르면 2010년에서 2019년 사이 양파 생산량의 연평균 변화율은 25.8%로 타 농산물 대비 큰 폭의 증감을 보였으며, 이에 따라 양파의 가격 변동성 역시 크게 나타나고 있는 실정이다. 농산물유통정보(KAMIS)의 2018년에서 2020년 월별 양파가격(전국/상품/20kg)을 이용하여 연도별 가격 변동성(annualized price volatility)을 산출한 결과, 12.04%(2018년), 27.80%(2019년), 34.28%(2020년)로 각각 나타나 타 농산물 대비 매우 큰 폭의 가격 변동성을 갖는 것으로 분석되었다.¹ 이러한 양파의 수급 불균형으로 인한 높은 가격 변동성은 농가들이 변동성을 위험 요소로 간주하여 양파 생산 규모를 축소하는 원인으로 작용할 수 있으며, 이는 농업 생산의 전반적인 위축과 사회적 후생 손실을 초래할 수 있다. 따라서 양파 수급 불균형을 완화할 수 있는 방안이 필요한 시점이다.

현재 우리나라 양파 공급의 대부분은 국내 생산에 의존하고 있다. 한국농촌경제연구원(2021)에 따르면 2019년 국내 양파 공급량 1,644천 톤 중 국내 생산량은 1,594천 톤으로 96% 이상을 국내 생산이 담당하고 있는 것으로 나타났다. 전술(前述)한 바와 같이 상대적으로 안정적인 양파의 소비량과 높은 국내 생산 비율을 기준으로 볼 때, 국내 양파 공급량 조정이 선제적으로 이루어질 수 있다면 일정 수준 이상의 양파 수급 안정을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

이를 위해 정부는 시장 공급량 조절을 통한 양파가격 안정화를 목표로 산지 폐기, 공공비축제도 등의 수급 안정 대책을 마련하고 있다. 이 중 산지 폐기는 2018년과 2019년도에 시행되었으며, 물량이 과도하게 공급되는 것을 제한하여 안정적인 시장 수급에 긍정적 영향을 미쳤다는 평가가 주를 이루었다. 그러나 일부 양파 생산 농가들은 좀 더 이른 시점에 해당 대책들이 시행되어야 함을 주장

1 동 기간 쌀의 해당 변동성은 6.92%(2018년), 1.89%(2019년), 9.02%(2020년)였으며, 간마늘 역시 6.8%(2018년), 18.2%(2019년), 24.0%(2020년)로 나타나 양파의 가격 변동성이 타 작목에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

하는데, 이를 세부적으로 살펴보면 생산량 추정 시기로 인해 발생된 문제임을 알 수 있다. 통상 정부의 양파 수급 안정 대책은 4월 말 발표되는 통계청의 양파 재배면적 조사 결과와 한국농촌경제연구원의 단수 예측치를 종합하여 총 생산량을 추정한 뒤 추정된 초과 수요량/공급량이 일정 수준 이상 일 경우, 수확을 한 달가량 남겨둔 5월 중순 이후에 발표 및 시행된다. 5월 중순은 양파의 구가 한창 비대(肥大)해지는 시점으로 초과 수요 또는 공급이 예상되더라도 농가의 경영의사 변경이 매우 어려운 시기이며, 정부 입장에서 산지 폐기 등의 수급 안정 대책을 시행하기 위해 많은 정책 비용이 요구되는 시기이다.

이러한 배경으로 양파 생산량을 예측하기 위한 많은 선행연구들이 진행되어 왔다. 우선 최성천 외(2016)의 연구에서는 공간 패널 회귀모형을 이용하여 지역별 10a당 양파 생산량에 유의한 영향을 주는 월별 기상 정보를 선정하고, 각각의 직접효과와 간접효과를 추정하였다. 그러나 양파 주산지만을 고려하였으며, 기상 자료의 부족으로 해당 시군의 기상 자료가 아닌 대체 시군의 기상 자료를 사용했다는 한계를 가진다. 공간 및 기상 요인을 통해 양파 단수를 추정한 오승원 외(2017)의 연구에서는 지역의 거리를 고려하여 공간 요인을 반영한 모형보다 기상 요인을 반영한 모형의 적합도가 더 높은 것을 확인하였으나, 외생 변수로 기상 요인만을 사용하였다는 한계점을 가진다. 정인철(2019)의 연구에서는 단계적 변수 선택법, LASSO(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator: LASSO), 주성분분석(Primary Component Analysis: PCA), 부분최소제곱법(Partial Least Squares: PLS)의 4가지 통계 기법을 통해 재배면적과 생산 단수에 대한 모형의 예측력을 비교하고, 주성분분석 모형이 가장 높은 정확도를 보임을 밝혔다. 그러나 재배면적과 생산 단수의 범위가 달라 정확한 지역별 예측이 어렵다는 한계를 보였다. 이승인 외(2020)의 연구에서는 기상 요인, 영농 투입제 비용 요인 사이의 교호작용을 베이지안 네트워크 분석을 통해 밝혔다. 다만 비료비, 농약비 등 영농 투입제 비용이 해당 필지의 데이터가 아닌 전국 평균 영농 투입제 비용 데이터를 사용하여 정확한 추정이 아니라는 한계를 가진다. 김준기 외(2020)의 연구에서는 양파의 최종 구중²을 추정하기 위해 생육 요인과 기상 요인을 활용한 다층(multilevel)모형을 도입하였다. 과거에 주로 사용했던 단층구조 모형이 아닌 위계적 자료의 특성을 반영한 다층구조 모형을 제시하여 생육 요인의 개체 수준과 기상 요인의 필지 수준을 모두 분석 단위로 받아들였다는 점에서 큰 차이점을

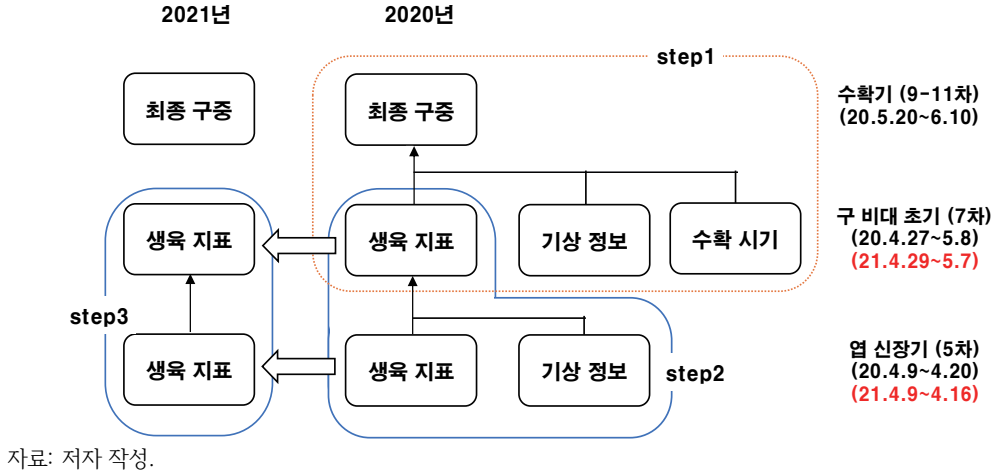
2 여기서 구중(球重)이란 식물의 구근이나 엽구 등의 무게를 의미한다.

보인다. 그러나 수확 시기에 따른 구중 변화를 분석 모형에 포함하지 않았다는 한계가 존재한다. 강윤정 외(2021)의 연구에서는 주성분분석과 부분최소제곱법을 이용하여 재배 기간 동안 양파의 구중에 유의한 영향을 주는 환경 요소를 도출하고, 재배 시 생육 관리에 관한 전략을 제시하였다. 다만 특정 지역의 데이터만을 사용한 분석으로 해당 연구 결과를 일반화하기에는 어렵다는 한계가 존재한다.

이상의 과정과 2021년 양파·마늘 의무경작신고제³ 시행을 근거로 본 연구의 목적을 양파의 안정적인 수급을 위한 구중(球重) 예측모형 개발로 설정하였다. 간략한 연구과정은 다음과 같다. 구중을 예측하기 위한 설명변수로는 개별 양파의 생육 지표와 필지별 기상 정보를 활용한다. 이는 선행연구에서 제시한 바와 같이 양파의 단수 및 구중이 재배 기간의 생육 요인뿐만 아니라 기상 요인에도 유의한 영향을 받는다는 사실을 기반으로 설정하였으며, 특히 수확 시기별 구중 차이를 통제하기 위한 변수를 도입하였다. 더하여 기상 요인이 필지별로 동일한 영향을 준다는 점을 고려하기 위하여 김준기 외(2020)와 같이 다층(multilevel)모형을 적용하였다. 분석 대상 품종은 생산면적을 기준으로 중만생종을 선택하였다. 개략적인 분석 절차는 다음과 같다<그림 1>. 우선 2020년 자료를 바탕으로 구 비대 초기(5월 초)의 생육 지표, 수확 시기 변수, 기상 자료를 이용하여 수확기 구중을 예측한다(step 1). 이후 엽 신장기(4월 초)의 생육 지표를 바탕으로 구 비대 초기(5월 초)의 생육 지표를 예측한다(step 2). 만일 해당 분석 결과의 정확도가 일정 수준 이상으로 실제 예측에 활용 가능하다면 생산량 예측 시기를 한 달가량 앞당김으로써 선제적인 수급 안정 대책의 수립에 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다. 더하여 2020년 생육조사 자료에서 구성된 모형을 2021년 생육조사 자료에 그대로 적용하여 모형 구성의 타당성을 검증하고자 하였다(step 3). 현재 KREI에선 2021년 10차 생육조사 자료까지 공개하여 구 비대 초기 지상부 추정만 실시하였고, 해당 단계에서는 기상 정보를 제외하여 엽 신장기하에서 지상부 추정이 가능하도록 하였다.

3 2021년부터 국내 농산물 최초로 양파와 마늘에 도입된 의무경작신고제는 재배면적 1,000㎡ 이상의 농가가 재배품종과 재배면적, 파종·수확 예정 시기 등을 의무적으로 신고해야 하는 제도이다. 해당 제도를 통해 과거에 비해 상대적으로 정확한 양파 재배면적을 사전에 알 수 있다.

그림 1. 본 연구의 분석과정



2. 분석 모형

현재 국내에서 양파 생육 자료를 제공하고 있는 대표적인 기관은 한국농촌경제연구원과 농촌진흥청으로, 두 기관 모두 개별 양파의 구중을 필지별로 제공하고 있다. 수확기 양파 구중은 개별 양파의 품종, 생육 지표 등과 더불어 필지(筆地) 내 동일하게 영향을 주는 기상, 토양 등 재배 환경 요인에 의해 결정된다(농촌진흥청 2018). 따라서 본 연구에서는 개체 수준의 생육 지표와 필지 수준의 환경 요인을 모두 분석과정에서 고려하기 위해 다층(multilevel)모형⁴을 분석에 적용하였다.

다층모형(multilevel model)은 종속변수가 개체(수준-1)의 특성과 집단(수준-2)의 특성에 모두 영향을 받는 위계적(hierarchical) 자료를 분석하는 데 특화된 모형이며, 시계열 데이터에 적용된 다층모형의 경우 성장 곡선 모형(growth curve model)이라 구분되어 불리기도 한다. 본 연구의 분석 자료는 필지별로 구분되어 개별 양파(수준-1)의 생육 지표와 각 필지(수준-2)의 재배 환경 요인 사이에 위계적 구조를 가진다는 특징이 있다.

4 연구에 따라 다층모형은 위계적 선형모형(hierarchical linear model), 혼합모형(mixed model), 랜덤효과모형(random effect model)이라고도 불린다.

즉 동일한 필지에 속한 개체들은 기상 정보를 공유하므로 구중이 서로 독립적이지 않고, 다른 필지에 속한 개체들의 구중은 서로 독립적임을 의미한다.⁵ 이러한 다층구조의 자료에 전술한 종속성을 고려하지 않고 일반적인 단층모형으로 추정 시에는 오차분산 추정값이 과소 추정(underestimated) 되고, 1종 오류(type 1 error)가 증가하게 된다(강상진 2016).

다층모형을 수준별로 나누어 설명하면 다음과 같다. 우선 수준-1에서 추정하고자 하는 대상은 각 필지의 양파 구중이며, 필지별 영향은 고려되지 않는다. 이는 일반적인 단층 회귀분석과 동일하며 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$(1) \text{ 수준-1 모형: } Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}X_{1ij} + \beta_{2j}X_{2ij} + \cdots + \beta_{pj}X_{pij} + e_{ij}, e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n(j), j = 1, 2, \dots, J$$

여기서 Y_{ij} 는 필지 j 에 속한 개체 i 의 구중을, X_{ij} 는 엽 신장기 또는 구 비대 초기의 지상부 생육 변수를, β_{pj} 는 필지 j 의 p 번째 생육변수의 회귀계수를, $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ 는 각 필지에서 잔차의 평균이 0이며 분산이 동일함을 의미한다.

위의 식 (1)에서 β_{pj} 는 필지 j 별로 다르게 추정될 수 있으며, 이는 생육변수가 양파 구중에 미치는 영향이 필지별로 서로 다를 수 있음을 의미한다. 예컨대 구 비대기의 초장이 수확기 최종 구중에 미치는 영향은 필지별로 다를 수 있다. 이는 아래 식 (2)와 같이 구성이 가능하다.

$$(2) \text{ 수준-2 모형: } \beta_{pj} = \gamma_{p0} + \gamma_{p1}W_{1j} + \gamma_{p2}W_{2j} + \cdots + \gamma_{pQ}W_{Qj} + u_{pj}$$

$$p = 0, 1, 2, \dots, P.$$

여기서 W_{Qj} 는 필지 j 의 Q 번째 기상 요인을, γ_{pQ} 는 필지 j 에서 p 번째 생육 지표의 회귀계수 (β_{pj})에 대한 Q 번째 기상 요인의 효과를 반영하는 모수를 의미하며, 잔차들은 $(P+1) \times (P+1)$ 의 분산-공분산행렬을 가진다.

이제 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 단일식으로 표현되는 2-수준 다층모형의 일반식을 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$(3) \text{ 일반화된 2-수준 다층모형:}$$

5 본 연구에서는 토양 정보 확보의 한계로 인해 재배 환경 요인 중 기상 정보만을 사용하였다.

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + \sum_{q=1}^{Q_0} \gamma_{0q} W_{q(j)} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0} X_{Pij} \\ + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^{Q(P)} \gamma_{pq} W_{q(p)} X_{\pi j} + u_{0j} + \sum_{p=1}^P u_{pj} X_{Pij} + e_{ij}$$

여기서 우변의 첫 항부터 순서대로 절편계수, 기상 요인(수준-2)의 고정효과, 생육 지표(수준-1)의 고정효과, 기상 요인과 생육 지표 간의 상호작용 고정효과를 나타내며, 마지막 세 개 항은 필지별 생육 지표 효과를 기상 요인 변수로 설명한 이후 남은 수준-1과 수준-2 잔차의 합을 의미하는 무선 효과를 나타낸다.

우선 다층모형을 이용한 분석에 앞서 해당 모형 적용의 타당성을 확보하기 위해 급내상관계수 (intraclass correlation coefficient: ICC)를 산출하고 유의성을 확인한다. 급내상관계수는 관찰된 전체 분산에서 필지 간 분산이 차지하는 비율을 의미하며, 해당 수치가 유의하다는 것은 집단에 의해 설명되는 부분이 통계적으로 유의하다는 것이므로 단층모형이 아닌 다층모형을 적용하는 것이 타당함을 의미한다. 예컨대 ICC 값이 0.2로 산출되었고 통계적으로 유의하다면, 구중이 필지에 의해 설명되는 비율이 20%라고 해석 가능하다. ICC 값은 위의 식 (3)에 의해 도출된 공분산 행렬을 바탕으로 산출되며 아래 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$(4) \quad ICC = \frac{Var(\beta_{0j})}{Var(Y_{ij})} = \frac{\sigma_{field}^2}{\sigma_{field}^2 + \sigma_{error}^2}$$

여기서 σ_{field}^2 는 필지 간 공분산을, σ_{error}^2 는 잔차의 공분산을 의미한다.

3. 분석 자료

본 연구에서는 우선 생육 지표로서 한국농촌경제연구원(KREI)에서 실시한 2020년 양파 생육조사 자료를 이용하였다. 해당 실측조사는 양파 표본농가 중 5년 이상 재배 경력을 가지고 있는 농가들 중 평균 생육을 대표할 수 있는 106개의 필지를 선정하여 2020년 2월 15일부터 6월 11일까지 진행하였다. 수확기로부터 상대적으로 먼 2~3월은 15일 주기로, 수확기가 근접한 4~6월은 10일 주기

로 총 11회 실시되었다. 조사항목은 초장, 엽수(잎 수), 엽초경(잎집 두께), 엽초장(잎집 길이) 등 지상부 생육 지표와 구중, 구직경 등 지하부 생육 지표로 구성된다.⁶

양파의 품종은 수확 시기에 따라 크게 조생종과 중만생종으로 나누어 볼 수 있으며, 품종별로 구비대 한계온도 등 생육 특성이 상이하다(농촌진흥청 2018). 이에 본 연구에서는 정확한 구중 예측 모형 구축을 위해 품종 구분이 필요하다고 판단하였다. 통계청(2021)에 따르면 2021년 양파 생산면적은 약 1만 8,014ha로, 이 중 중만생종 생산면적이 약 90%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 양파 생산면적의 상당 부분을 차지하는 중만생종을 구중 예측 대상으로 선정하였다. 이에 KREI에서 조사한 56개 필지 중 50개의 중만생종 수확 필지를 선정하였고, 구중 측정치에 이상이 있다고 판단한 필지 8개를 제외하여 42개 필지, 총 563개 개체를 최종 대상으로 선정하였다.⁷

양파의 생육과정은 크게 유모기(8~10월), 활착기(11~12월), 월동기(12~2월), 경엽 신장기(2~4월), 구비대기(4~6월)로 구분된다(농촌진흥청 2018). 일반적으로 3월 중순부터 4월 중순까지 양파의 새 잎이 많이 나오는 시기를 엽 신장기로 부르고 있으며, 그 이후로는 새로운 잎이 나오는 경우는 드물다(이종태 2015). 더하여 5월 초부터 중순까지는 잎의 신장과 함께 구가 비대해지는 초기로, 이 시기가 지나면 잎이 마르기 시작하는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 볼 때, 생육 지표를 이용하여 구중을 직접 예측할 수 있고 해당 결과를 신뢰할 수 있는 가장 이른 시기는 5월 초로 판단되며, 해당 시기는 KREI 생육조사의 7회차(조사시기: 2020년 기준, 4월 27일~5월 8일)에 해당된다. 이에 본 연구에서는 구중을 예측하기 위한 자료로 KREI의 2020년 7차 생육조사 자료를 이용한다.

앞서 서론에서 제시한 바와 같이 양파 수급 안정 대책은 통상 수확을 한 달 정도 남겨둔 시점에서 수립 및 발표되며, 해당 시기는 이미 구의 비대가 한창인 시점으로 관련 대책 시행에 따른 많은 정책적 비용이 요구된다. 이에 만약 해당 시기보다 좀 더 이른 시점에 양파 생산량 예측이 이루어진다면 양파 수급 안정이라는 목표를 달성하기가 좀 더 용이할 것으로 판단되며, 국가적 그리고 개인적 후생 손실 역시 일정 수준 감소할 수 있다. 이에 본 연구에서는 엽 신장기가 마무리되어가는 시점인 KREI의 2020년 5회차(조사시기: 2020년 기준, 4월 9~20일) 생육조사 자료를 이용하여 7차 생육

6 초장(草長)은 잎이 녹색을 띤 부분의 길이를, 엽수(葉數)는 잎의 수를, 엽초경(葉草徑)은 줄기나 잎의 아랫부분을 감싸고 있는 부분을 의미하는 잎집의 두께를, 엽초장(葉草長)은 잎집의 길이를 의미한다(이종태 2015).

7 1차 분석 대상 선정 기준은 모든 시점의 조사 완료 여부, 표본 교체 여부, 병해충 발생 여부 등이었으며, 해당 과정을 통해 확보된 577개의 자료 중 생육 지표별 평균으로부터 ± 3 표준편차 구간을 벗어나 측정 및 코딩 과정에 문제가 있었을 것으로 판단되는 14개의 자료를 제거한 후 분석을 수행하였다.

지표들을 추정하고자 한다. 만약 5회차 자료를 이용하여 추정한 7회차 생육 자료의 정확도가 일정 수준 이상이라면 이를 바탕으로, 비록 7회차에 추정된 최종 단수에 비해 예측 정확도가 약간 낮더라도 최종 단수 예측 시기를 한 달 정도 앞당길 수 있다.

더하여 양파 생육 전문가 대상 자문 결과, 수확 시기에 따라 구중이 크게 달라질 수 있으며 지역별로 약간씩 상이하나 대략 5월 20일부터 6월 10일 사이에 최종 구중의 절반 정도가 증가한다고 밝혔다. 이는 KREI 생육조사의 수확기(9, 10, 11차) 조사 시기와 거의 일치하므로 9차 조사를 기준으로 10차와 11차에 수확된 양파에 대한 더미변수를 통해 해당 효과를 통제하였다. 아래 <표 1>은 본 연구에서 사용된 생육 지표 및 수확 시기 더미변수에 대한 기초통계량이다.

표 1. 생육데이터 기초통계량

생육과정 (조사 회차)	생육 지표	N	Mean	Std. Dev.	Min	Max
엽 신장기 (5회차)	초장(cm)	563	65.80	12.05	27.00	100.60
	엽수(매)	563	7.82	1.29	4.00	14.00
	엽초장(cm)	563	9.26	3.06	2.10	19.80
	엽초경(mm)	563	18.72	4.07	5.00	29.63
구 비대 초기 (7회차)	초장(cm)	563	82.30	11.65	47.90	115.10
	엽수(매)	563	8.89	1.39	5.00	13.00
	엽초장(cm)	563	16.69	3.68	6.30	26.80
	엽초경(mm)	563	22.02	4.18	11.21	34.40
수확기(9회차)	생구 무게(g)	51	241.57	75.14	108.00	403.00
수확기(10회차)		346	319.34	100.47	120.00	619.00
수확기(11회차)		166	323.70	94.63	109.00	615.00

주: 잎마름병, 노균병, 무름병 등 병해 발생과 측정 초기 종료로 인한 생육 부진이 예상되는 필지 등을 제외함.

자료: 한국농촌경제연구원 농업관측 통계정보시스템. 생육조사정보.

본 연구에서는 양파 구중 예측을 위해 생육 지표와 수확 시기 더미변수에 더하여 기상 자료를 예측변수로 적용하였다. 우선 필지의 생육 데이터와 기상 데이터의 불일치 문제를 해결하고자 국립농업과학원 소기후 모형에 의해 추정된 실측 농가별 기상 데이터를 사용하였다. 소기후 모형은 지역이 복잡하고 소규모 농장이 많은 우리나라 농업 환경에서 재해 위험을 예측하고 대비하기 위한 모형으로, 우리나라 전역에 대해 필지 단위까지 정밀한 기상 정보를 추정하도록 개발되었다(김대준 외 2019). 소기후 모형에 적용된 기술은 아래 <표 2>와 같다.

표 2. 소기후 모형 적용기술 요약

기상 요인		적용기술
기온	최고	관측소별 최고기온 관측값을 IDW 방법으로 공간내삽한 후 동적 해발고도 보정, 일사효과를 적용(김대준, 윤진일, 2013)
	최저	관측소별 최저기온 관측값을 IDW 방법으로 공간내삽한 후 동적 해발고도 보정, 도시열섬효과, 온난대 보정, 냉기류 보정을 적용(김대준 외, 2012)
	평균	최고기온과 최저기온의 평균
강수량		PRISM(Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model) 모형을 이용 (김대준, 윤진일, 2013)
일조시간		시간별 음영기복도를 이용하여 추정(김승호, 윤진일, 2016)
일사량		관측소별 일적산일사량 관측값을 IDW 방법으로 공간내삽한 후 수평면일사량의 지형보정치인 상대일사량지수 분포도 (Potential Relative Radiation: PRR)를 이용하여 보정(윤진일, 2009)

자료: 농촌진흥청. 농업날씨. 소기후 모형.

소기후 모형에서 제시된 실측 농가의 기상 요인들을 활용하여 분석에 필요할 것으로 판단되는 파생 기상 변수를 산출하였다. 파생 기상 변수 도출 근거가 되는 양파의 생리적 특성은 다음과 같다. 김재휘 외(2021)의 연구에 의하면 중만생종 구 비대에 요구되는 적당한 온도는 20℃ 내외인 것으로 나타났다. 해당 온도에서는 엽초의 생육이나 구의 비대가 지속적으로 이루어지기 위한 탄소동화 작용이 활발하게 이루어진다. 그러나 25℃ 이상의 고온에서는 생육이 둔해지고, 고온이 계속되면 생육이 정지하게 된다. 이를 고려하기 위해 최적기온일수와 고온일수를 산출하였다. 더하여 양파 종자는 햇빛이 없는 조건에서 발아율이 높지만 구 비대기에는 일정 이상의 일조시간과 일사량이 요구된다. 일반적으로 중만생종은 조생종과 비교하면 생육과정에 요구되는 일사량이 많고, 구체적으로는 13~14.3시간의 일조시간이 필요하다(농촌진흥청 2018). 이를 고려하기 위해 누적일사량과 누적일조시간을 산출하였다. 마지막으로 양파는 구 비대가 시작되는 시기에 많은 물이 필요하며, 이 시기에 건조하면 구 비대가 정상적으로 이뤄지지 않아 수량이 현저히 감소한다. 구체적으로는 7~10일 간격으로 30~40mm의 강수량이 필요하다(농촌진흥청 2018). 따라서 누적강수량에 더해 기상청 가뭄판단지수를 통한 강우일수를 산출하여 강수량과 건조 시기를 고려하고자 하였다. 파생 기상 변수의 상세한 내용은 <표 3>과 같다.

표 3. 파생 기상 변수의 정의

파생 기상 변수	정의
최적기온일수(일)	최고기온이 20°C 내외(15~25°C)인 날들의 수
고온일수(일)	최고기온이 25°C 이상인 날들의 수
누적일사량(MJ/m ²)	일 일사량 누적
누적일조시간(시간)	일 일조시간 누적
누적강수량(mm)	일 강수량 누적
강우일수(일)	강수량이 5mm 이상인 날들의 수 ⁸
수확 전 강수량(mm)	최종 조사 전 3일간의 누적강수량

일반적으로 양파 수확은 토지가 충분히 건조된 상태에서 이루어진다. 건조되지 않은 상태에서 양파를 수확하면 줄기 절단면이나 구의 상처로 병원균이 침입하여 번식할 가능성이 커지기 때문에 기상 조건에 따라 수확 시기를 조절한다. 그러나 생육조사에서는 일정상의 한계로 수확 시기를 조절하는 것이 쉽지 않을 것으로 판단된다. 이에 최종 조사 전 3일간의 누적강수량을 설명변수로 도입하여 해당 효과를 통제하고자 하였다. 앞서 제시한 과정을 근거로 본 연구에서 채택한 기상 자료의 기초통계량은 <표 4>와 같다.

표 4. 기상 데이터 기초통계량

생육과정	기상 변수	Mean	Std. Dev.	Min	Max
엽 신장기 (5회차)	평균기온(°C)	12.34	1.62	9.65	15.99
	최고기온(°C)	18.66	2.24	14.66	21.73
	최저기온(°C)	5.51	1.49	2.25	8.42
	최적기온일수(일)	12.75	2.97	8.00	21.00
	고온일수(일)	2.37	1.91	0.00	5.00
	누적일사량(MJ/m ²)	421.08	76.12	151.52	552.10
	누적일조시간(시간)	152.50	18.34	118.28	196.33
	누적강수량(mm)	67.31	80.03	20.12	414.08
구 비대기 (7회차)	강우일수(일)	2.73	0.96	1.00	5.00
	평균기온(°C)	17.79	0.76	16.61	19.76
	최고기온(°C)	23.79	1.28	21.48	26.45

⁸ 8 일 강수량 5mm는 기상청 가뭄판단지수에서 사용되는 지표로, 일 강수량이 5mm 이하의 일수가 15일 이상 지속되고 1개월 강수량이 50mm 이하일 때 가뭄으로 판단한다.

(계속)

생육과정	기상 변수	Mean	Std. Dev.	Min	Max
구 비대기 (7회차)	최저기온(°C)	11.80	0.94	9.13	13.41
	최적기온일수(일)	4.61	2.22	2.00	20.00
	고온일수(일)	11.38	6.50	0.00	24.00
	누적일사량(MJ/m ²)	630.62	112.57	444.30	877.61
	누적일조시간(시간)	192.81	35.81	131.07	264.18
	누적강수량(mm)	138.98	67.55	73.03	295.16
	강우일수(일)	6.15	1.83	3.00	9.00
	수확 전 강수량	7.41	9.48	0.00	31.85

4. 분석 결과

우선 2020년 KREI 생육조사 자료에서 다층모형 적용의 타당성을 검증하였다. 이때 모형의 종속 변수는 최종 구중이고, 독립변수로 필지별 상수항에 대한 임의효과(random effect)만을 포함하며 이를 M1이라 칭한다. 도출된 ICC의 값은 1% 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타나 개체 수준의 측정치가 필지라는 집단 속에 군집화(clustered)되어 있는 위계적 자료라는 것을 보여주며, 다층모형 적용의 타당성을 뒷받침하였다<표 5>. 더하여 ICC가 27.995로 산출되어, 구중의 전체 분산 중 필지에 따라 설명되는 부분이 약 28%, 양파 개체 간의 차이로 설명되는 부분이 약 72%임을 나타내었다.

표 5. 군집분석을 통한 다층모형 적용의 적합성 검정 결과

모형	ICC	Std. Err.	Chisq	Prob	[95% Conf. Interval]	
M1	27.995	0.055	108.52	0.0000	0.186	0.398

4.1. 구 비대 초기 생육 지표와 기상 요인을 통한 수확기 구중 예측

본 연구에서 양파 구중 예측을 위한 다층모형의 설정은 Bell et al.(2013)에서 제시한 과정을 바탕으로 수행되었다. 우선 모형 설정 시 설명변수로 고려된 수준별 요인들은 <표 6>과 같으며, 엽초장과 초장 간의 상관도를 고려하여 초장 중 엽초장의 비율인 ‘엽초장비율’ 변수를 생성하여 설명변수로 고려하였다.

표 6. 구중 예측모형 설정 시 고려된 수준별 설명변수

요인	예측변수
생육 지표 (수준-1)	초장 엽수 엽초장비율 엽초경
기상 요인 (수준-2)	평균기온 최고기온 최저기온 최적기온일수 고온일수 누적일사량 누적일조시간 누적강수량 강우일수 수확 전 강수량

본 연구의 모형 선정과정을 간략히 요약하면 다음과 같다. 수확 시기에 따라 구조적으로 발생하는 구중의 차이를 모형에 반영하기 위해 앞서 제시한 M1에 10차, 11차 조사에 해당하는 수확 시기 더미변수인 D10과 D11을 도입하였으며, 두 변수 모두 통계적 유의성을 확보하는 것으로 나타나 해당 변수들을 유지하고 이를 M2라 칭하였다. 여기서 특정 설명변수의 포함 여부는 AICc(Corrected Akaike Information Criterion)⁹와 BIC(Bayesian Information Criterion)를 기준으로 결정하였으며, 정보기준지수(Information criterion Index)가 낮을수록 더 높은 모형 적합도를 가진다고 판단한다. 다음으로 M2의 해당 변수들을 유지하고, 통계적으로 유의한 생육 지표만의 고정효과를 포함하여 이를 M3라 칭하였다. 이후 M3에 포함된 생육 지표별로 통계적으로 유의한 랜덤효과를 탐색하였다. 만약 특정 생육 지표에 랜덤효과가 통계적으로 유의하다면 이는 필지별로 해당 생육 지표가 구중에 미치는 영향이 다르다는 것을 의미한다. M3의 랜덤효과 검증 결과, 본 연구에서는 랜덤효과를 가진 생육 지표가 발견되지 않아 해당 효과를 예측모형에 고려하지 않았다. 다음으로 M3의 해당 변수들을 유지하고, 통계적으로 유의한 기상 요인만의 고정효과를 포함하여

⁹ AICc는 AIC가 상대적으로 적은 샘플에서 편향되는 것을 수정한 것으로 두 정보 기준의 차이는 추가적인 설명변수 도입에 대한 페널티 크기에 있으며, AIC보다 AICc에서 해당 페널티를 더 크게 부여한다. 단 샘플 크기가 증가하면 두 정보 기준은 수렴하게 된다(Bell et al. 2017).

이를 M4라 칭하였다. M4의 랜덤효과 검증 결과, 본 연구에서는 랜덤효과를 가진 기상 요인이 발견되지 않았다. 따라서 각 변수의 고정효과만을 포함한 M4 모형을 최종 모형으로 선정하였으며, 단계별 최적으로 선정된 모형의 분석 결과는 아래 <표 7>과 같다.

표 7. 구중 예측모형별 추정 결과

	M1	M2	M3	M4
Fixed Effects				
Intercept	313.295*** (8.849)	241.137*** (26.334)	-196.071*** (47.094)	-217.694*** (46.509)
D10		78.134*** (28.329)	78.712*** (26.250)	83.188*** (23.360)
D11		82.715*** (30.127)	86.415*** (27.750)	116.608*** (29.134)
초장(cm)			1.021** (0.433)	0.943** (0.421)
엽수(매)			17.717*** (3.225)	18.702*** (3.190)
엽초장비율(%)			2.063** (1.013)	1.886* (0.998)
엽초경(mm)			6.910*** (1.082)	6.838*** (1.060)
최적기온일수(일)				5.320** (2.699)
고온일수(일)				-11.274** (4.721)
Error Variance				
Level-1	7078.801*** (438.574)	7077.233*** (438.380)	5317.634*** (330.517)	5318.974*** (330.534)
Level-2 Intercept	2752.212*** (718.225)	2212.908*** (598.932)	1901.996*** (523.670)	1407.654*** (410.710)
ICC	27.995	23.820	26.345	20.927
Model Fit				
AICc	6671.079	6667.439	6519.106	6513.101
BIC	6676.078	6689.105	6558.106	6560.767

주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

최종 모형인 M4의 추정 결과를 살펴보면 다음과 같다. 우선 9차 조사 시점에 수확된 양파의 구중을 기준으로 다른 변수들의 값이 평균에 위치할 때, 10차, 11차 조사 시점에 수확된 양파는 각각 83.19g, 116.61g 정도의 무게가 더 나가는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에서 수행한 자문 결과

(대략 5월 20일부터 6월 10일 사이에 최종 구중의 절반 정도가 증가)를 일정 수준 뒷받침하는 근거가 되며, 구중 예측모형 구축 시 수확 시기에 대한 통제가 반드시 필요함을 나타낸다. 더하여 생육 지표인 초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경은 구중에 모두 양(+)의 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 일반적으로 예상되는 부호 방향과 일치한다고 볼 수 있다. 구체적으로는 초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경이 1단위 증가하면 최종 구중은 각각 0.94g, 18.70g, 1.89g, 6.84g 증가하는 것으로 추정되었다.

기상 요인 중 최적기온일수는 양(+)의 영향을, 반대로 고온일수는 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 세부적으로는 최적기온일수가 1일 증가하면 최종 구중은 5.32g 증가하고, 고온일수가 1일 증가하면 최종 구중은 11.27g 감소하는 것으로 추정되었다. 해당 기상 요인에 대한 추정 결과는 농촌진흥청(2018)에서 제시하고 있는 중만생종 양파의 구 비대 최적온도가 20℃ 내외라는 점과, 25℃ 이상의 고온에서는 탄소동화작용이 저하되어 탄수화물이 구로 내려가 축적되는 과정을 방해한다는 내용을 뒷받침하는 결과로 볼 수 있다.

4.2. 엽 신장기 생육 지표와 기상 요인을 통한 구 비대 초기 지상부 예측

4.2.1. 엽 신장기 생육 지표와 기상 요인을 통한 구 비대 초기 생육 지표 예측

앞서 구 비대 초기의 생육 지표와 기상 요인을 활용하여 최종 구중을 추정하였다. 본 절에서는 동일한 분석 방법을 이용하여 엽 신장기의 생육 지표와 기상 요인을 바탕으로 구 비대 초기의 생육 지표(초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경)를 추정하였다. 아래 <표 8>은 구 비대 초기의 생육 지표 예측을 위해 고려된 엽 신장기의 생육 지표와 기상 요인을 나타낸다.

표 8. 구 비대 초기 생육 지표 예측모형 설정 시 고려된 수준별 설명변수

요인	예측변수
생육 지표 (수준-1)	초장 엽수 엽초장비율 엽초경
기상 요인 (수준-2)	평균기온 최고기온 최저기온 최적기온일수 고온일수 누적일사량 누적일조시간 누적강수량 강우일수 수확 전 강수량

우선 각각의 생육 지표 예측에서 다층모형 적용의 타당성을 검증하였다. 이때 모형의 종속변수는 각각의 생육 지표이고, 독립변수로 필지별 상수항에 대한 임의효과만을 포함하였다. 분석 결과 구 비대 초기의 초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경을 종속변수로 구성한 모형의 ICC 값은 각각 61.904, 38.378, 34.959, 40.032로 산출되었으며<표 9>, 도출된 ICC의 값 모두 1% 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타나 다층모형 적용의 타당성을 뒷받침하였다.

표 9. 군집분석을 통한 다층모형 적용의 적합성 검정 결과(2020)

모형	ICC	Std. Err.	Chisq	Prob	[95% Conf. Interval]	
초장	61.904	0.056	173.92	0.000	0.505	0.721
엽수	38.378	0.060	51.82	0.000	0.275	0.506
엽초장비율	34.959	0.059	160.26	0.000	0.245	0.471
엽초경	40.032	0.061	86.32	0.000	0.289	0.523

다음의 <표 10>은 각각의 구 비대 초기 생육 지표별로 선정된 최종 모형을 나타낸다. 특정 설명 변수의 포함 여부는 AICc와 BIC를 기준으로 결정하였으며, 생육 지표마다 통계적으로 유의한 생육 지표와 기상 요인만을 포함하였다. 구 비대 초기 초장은 엽 신장기의 초장이 1단위 증가할 때 0.56cm, 엽수가 1단위 증가할 때 0.93cm 증가하나 엽초장비율이 1단위 증가할 때에는 0.22cm 감소하는 것으로 분석되었다. 엽 신장기 동안의 최고기온과 강우일수의 증가는 구 비대 초기 초장에 양(+)의 영향을 주는 것으로 나타났는데 이는 해당 시기의 온도가 높을수록 지상부 생장이 빠르다는 기존의 연구와 일치하며, 4월 초 가뭄의 피해를 받지 않는다면 지상부 생장이 양호하다는 것을 의미한다.

구 비대 초기 엽수는 엽 신장기의 엽수가 1단위 증가할 때 0.31매, 엽초경이 1단위 증가할 때 0.09매 증가하는 것으로 나타났으나, 엽초장비율이 1단위 증가할 때 0.05매 감소하는 것으로 추정되었다. 엽 신장기 동안의 최고기온의 증가는 구 비대 초기 엽수에 양(+)의 영향을 주는 것으로 분석되었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 해당 시기 온도가 높을수록 지상부 생장이 빠르다는 것과 일치한다.

구 비대 초기 엽초장비율은 엽 신장기 초장이 1단위 증가할 때 0.04%, 엽초장비율이 1단위 증가할 때 0.57% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 구 비대 초기 초장에 엽 신장기 엽초장비율이 미치는 영향과 상반되는 결과이다. 엽 신장기 동안의 최적기온일수의 증가는 구 비대 초기 엽초장비율에 양(+)의 영향을 주는 것으로 분석되었다.

구 비대 초기 엽초경은 엽 신장기 초장, 엽수, 엽초경이 1단위 증가할 때 각각 0.05mm, 0.45mm, 0.50mm 증가하는 것으로 분석되었으며, 엽 신장기 동안의 고온일수의 증가는 구 비대 초기 엽초경에 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 일정 온도 이상에서 고온에 의한 장애가 발생하여 생육이 둔해진다는 기존 연구 결과와 일치한다. 구 비대 초기 추정 모형 분석 결과를 통해 모든 지상부에서 온도와 관련된 기상 요인에 영향을 받는 것을 볼 수 있다.

표 10. 구 비대 초기 생육 지표 예측모형 설정 시 고려된 수준별 설명변수

Fixed Effects		초장(cm)	엽수(매)	엽초장비율(%)	엽초경(mm)
Level-1	Intercept	21.996*** (6.857)	3.745*** (0.983)	6.490*** (1.837)	5.878*** (1.940)
	초장(cm)	0.558*** (0.039)		0.042*** (0.016)	0.051*** (0.019)
	엽수(매)	0.928** (0.272)	0.312*** (0.048)		0.451*** (0.131)
	엽초장비율(%)	-0.219** (0.105)	-0.047*** (0.017)	0.565*** (0.046)	
	엽초경(mm)		0.091*** (0.017)		0.495*** (0.051)
Level-2	최고기온(°C)	0.673* (0.344)	0.089* (0.050)		
	강우일수(일)	2.567*** (0.792)			
	최적기온일수(일)			0.255** (0.101)	0.150 (0.113)
	고온일수(일)				-0.819*** (0.189)
Error Variance		Estimate	Estimate	Estimate	Estimate
Level-1		36.944*** (2.292)	0.952*** (0.059)	7.168*** (0.445)	7.099*** (0.441)
Level-2 Intercept		20.933*** (5.255)	0.447*** (0.115)	3.406*** (0.889)	4.271*** (1.071)

주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

4.2.2. 2020/2021 분석 결과 비교 및 예측 정확도 검정

2021년 6월 21일 기준 KREI에서는 10차 생육조사 자료까지 공개하고 있으므로, 2020년 생육조사 자료를 바탕으로 구성된 구 비대 초기 생육 지표 예측모형을 2021년 생육조사 자료에 그대로 적용할 수 있다. 이에 본 절에서는 2020년 생육조사 자료를 이용하여 도출한 구 비대 초기 생육 지표 예측모형의 회귀계수와 해당 모형을 2021년 생육조사 자료에 그대로 적용하였을 때 산출되는 회귀계수 사이에 통계적 유사성을 분석한다. 예를 들어, 구 비대 초기(7차 조사) 엽수 예측모형에는 <표 10>과 같이 엽 신장기(5차 조사)의 엽수, 엽초장비율, 엽초경이 수준-1의 설명변수로 사용되었다. 본 단계에서는 엽 신장기부터 구 비대 초기 사이의 기상 정보가 부재한 상황을 상정하므로 이를 제외하여 엽 신장기 초기에 구 비대 초기 지상부 추정 가능성이 가능하도록 하였고, 이는 앞서 제시한 구 중 예측모형의 M3와 유사한 형태이다.

전술한 분석들과 동일하게 각각의 생육 지표 예측에서 다층모형 적용의 타당성을 검증하였으며, 도출된 ICC의 값 모두 1% 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타나 다층모형 적용의 타당성을 뒷받침하였다<표 11>.

표 11. 군집분석을 통한 다층모형 적용의 적합성 검정 결과(2021)

모형	ICC	Std. Err.	Chisq	Prob	[95% Conf. Interval]	
초장	55.583	0.078	173.92	0.000	0.402	0.700
엽수	27.869	0.075	51.82	0.000	0.156	0.446
엽초장비율	40.682	0.083	160.26	0.000	0.259	0.573
엽초경	40.682	0.083	86.32	0.000	0.259	0.573

다음의 <표 12~15>와 <그림 2>는 2020년 구 비대 초기 생육 지표 예측모형의 분석 결과와 해당 모형을 2021년 자료에 그대로 적용하였을 경우의 분석 결과를 나타낸다. 2020년, 2021년의 회귀계수 비교 결과, 모든 회귀계수의 부호가 동일하며 그 크기 또한 5% 유의수준에서 통계적으로 무차별한 것으로 나타났다. 다만 2021년의 엽초장비율은 5% 수준에서 통계적 유의성을 확보하지 못하는 것으로 분석되었다. 엽 신장기의 초장, 엽수, 엽초장비율이 수준-1의 설명변수로 사용된 구 비대 초기의 초장 예측모형의 경우 역시 설명변수별 회귀계수가 5% 유의수준에서 통계적으로 무차별한 것으로 분석되었다. 다만 2021년 엽수와 엽초장비율이 구 비대 초기의 초장에 미치는 영향은 5%

수준에서 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 구 비대 초기 엽초장비율 예측모형에는 엽 신장기의 초장과 엽초장비율이 수준-1의 설명변수로 사용되었으며, 2020년, 2021년의 회귀계수 비교 결과, 모든 회귀계수의 부호 및 크기가 5% 유의수준에서 무차별한 것으로 나타났다. 끝으로 엽 신장기의 초장, 엽수, 엽초경이 수준-1의 설명변수로 사용된 구 비대 초기 엽초경 예측모형에서는 설명변수별 연도 간 회귀계수들의 부호가 동일하며 그 크기 또한 5% 유의수준에서 무차별한 것으로 나타났다. 다만 2021년 구 비대 초기의 엽초경에 엽 신장기의 엽수가 미치는 영향은 5% 유의수준에서 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

전술한 분석 결과를 종합하면 다음과 같다. 엽 신장기 생육 지표를 바탕으로 구성된 구 비대 초기 생육변수 예측모형의 2020년과 2021년의 회귀계수들은 5% 유의수준에서 통계적으로 무차별한 것으로 나타나, 각각의 설명변수가 종속변수에 미치는 영향이 유사한 것으로 판단된다. 특히 구중 결정에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 엽수의 경우(Emma Erler 2020), 2020년과 2021년 회귀계수 간 크기가 매우 유사한 것으로 나타나 해당 설명변수들을 예측에 활용하는 것이 타당함을 입증하였다. 이상의 결과는 본 연구의 설명변수 선정이 일정 수준 적합하였음을 의미하며, 특히 KREI 실측조사가 통일성을 유지하며 수행되고 있음을 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다.

표 12. 2020/2021 구 비대 초기 엽수 예측모형 분석 결과

		2020		2021	
Fixed Effects		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1	Intercept	5.340 ***	0.397	5.281 ***	0.489
	엽수(매)	0.323 ***	0.047	0.323 ***	0.068
	엽초장비율(%)	-0.046 ***	0.017	-0.014	0.022
	엽초경(mm)	0.089 ***	0.017	0.060 **	0.024
Error Variance		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1		0.952 ***	0.059	0.795 ***	0.067
Level-2 Intercept		0.482 ***	0.123	0.245 ***	0.098

주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

표 13. 2020/2021 구 비대 초기 초장 예측모형 분석 결과

		2020		2021	
Fixed Effects		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1	Intercept	39.916***	3.133	45.692***	0.053
	초장(cm)	0.574***	0.039	0.513***	4.075
	엽수(매)	0.952***	0.274	0.444	0.492
	엽초장비율(%)	-0.186*	0.106	-0.163	0.162
Error Variance		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1		36.949***	2.292	42.933***	3.606
Level-2 Intercept		28.846***	7.009	21.438***	7.641

주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

표 14. 2020/2021 구 비대 초기 엽초장비율 예측모형 분석 결과

		2020		2021	
Fixed Effects		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1	Intercept	9.824***	1.230	11.680***	1.299
	초장(cm)	0.043***	0.016	0.048***	0.015
	엽초장비율(%)	0.556***	0.046	0.408***	0.054
Error Variance		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1		7.168***	0.445	4.838***	0.404
Level-2 Intercept		4.010***	1.025	2.899***	0.952

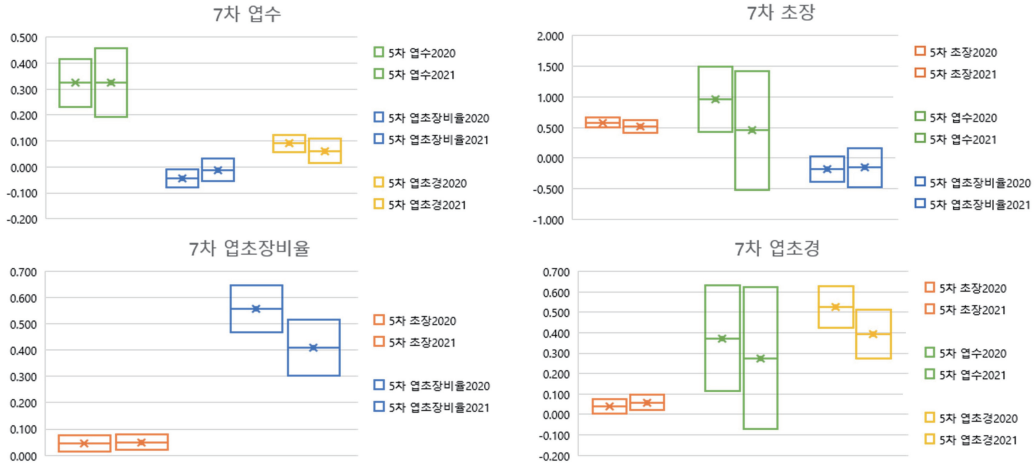
주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

표 15. 2020/2021 구 비대 초기 엽초경 예측모형 분석 결과

		2020		2021	
Fixed Effects		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1	Intercept	6.864***	1.300	7.230***	1.277
	초장(cm)	0.037*	0.019	0.055***	0.019
	엽수(매)	0.371**	0.131	0.273	0.177
	엽초경(mm)	0.524***	0.051	0.392***	0.061
Error Variance		Estimate	Std. Err.	Estimate	Std. Err.
Level-1		7.106***	0.441	4.531***	0.381
Level-2 Intercept		6.423***	1.567	4.892***	1.588

주: ***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$

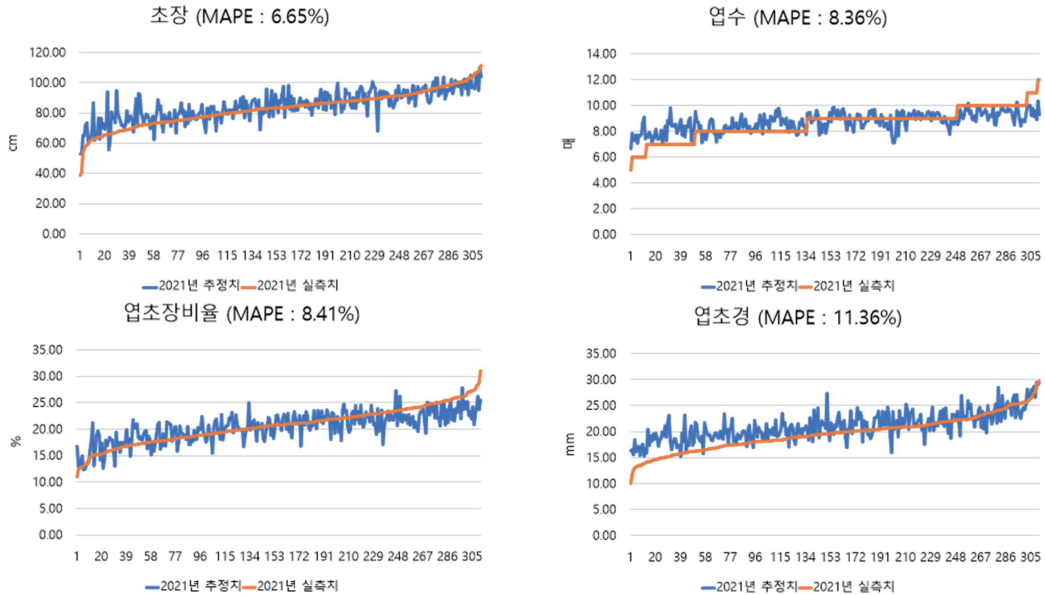
그림 2. 2020/2021 구 비대 초기 생육 지표 예측모형 분석 결과



마지막으로 구 비대 초기 생육 지표 예측모형의 정확도를 확인하기 위해 2020년 회귀계수를 이용하여 2021년 추정치를 도출하고¹⁰, 이를 2021년 실측치와 비교하여 평균절대비율오차(Mean Absolute Percentage Error: MAPE)를 계산하였다<그림 3>. 분석 결과, 초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경에 대한 MAPE는 각각 6.65%, 8.36%, 8.41%, 11.36%로 나타나 상대적으로 높은 예측 정확도를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 엽 신장기 생육 지표를 이용하여 구 비대 초기 생육 지표를 일정 수준 이상 예측할 수 있다는 것을 의미하며 구중 예측 시기를 현행보다 좀 더 앞당길 수 있다는 가능성을 시사한다.

10 2020년 자료를 바탕으로 구성된 2021년 구 비대 초기 생육 지표 추정치는 다음의 식을 바탕으로 산출되었다. $\hat{Y}_{ij,2021} = \gamma_{00,2021} + \sum_{q=1}^{Q_0} \gamma_{0q,2021} W_{q(j),2021} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0,2020} X_{Pj,2021}$. 여기서 하첨자(subscript) 2020, 2021은 사용된 자료의 조사 연도를 의미한다.

그림 3. 2021년 구 비대 초기 생육 지표 추정치와 실측치 비교 결과



5. 요약 및 결론

우리나라의 대표적인 양념채소 중 하나인 양파의 연간 소비량은 대체로 안정적이나, 상대적으로 높은 생산량 변화로 인해 타 농산물 대비 큰 폭의 가격 변동성을 보이고 있다. 이러한 양파의 높은 가격 변동성은 농가들의 경영 위험 및 소비자 후생 손실로 연결될 수 있으며, 이에 더해 수급 대책의 수립 및 시행으로 인한 과도한 재정 지출 요인으로 작용할 수 있다. 이에 본 연구는 생육 지표와 기상 정보를 바탕으로 양파의 안정적 수급을 위한 구중 예측모형을 구축하고자 수행되었다. 한국농촌경제연구원의 생육조사 자료 및 국립농업과학원 소기후 모형에 의해 추정된 농가별 기상 데이터를 각 생육 지표와 기상 정보 자료로서 분석에 이용하였으며, 개체 수준의 생육 지표와 필지 수준의 환경 요인을 동시에 고려하고자 다층모형을 분석에 적용하였다.

우선 구 비대 초기(5월 초)의 생육 지표, 수확 시기, 기상 자료에 다층모형을 적용하여 구중 예측

모형을 구성하였다. 분석 결과, 5월 20일부터 6월 10일 사이에는 수확 시기가 늦어짐에 따라 양파 구중이 크게 증가하는 것으로 나타나 향후 생육 자료를 이용한 구중 예측모형 구성 시, 수확 시기 통제가 반드시 고려되어야 함을 나타냈다. 더하여 구 비대 초기의 생육 지표인 초장, 엽수, 엽초장비율, 엽초경은 모두 최종 구중에 양(+)의 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 기상 요인 중 최적기온일수는 구중에 양(+)의 영향을, 반대로 고온일수는 음(-)의 영향을 미치는 것으로 분석되어 기존의 연구 결과와 부합하는 것으로 나타났다.

이에 더해 보다 앞선 구중 예측을 위한 사전 단계로 엽 신장기(4월 초)의 생육 지표와 기상 정보를 바탕으로 구 비대 초기(5월 초)의 생육 지표 예측모형을 구성하여 구 비대 초기에 영향을 미치는 생육 지표와 기상 요인을 도출하였으며, 이후 해당 결과의 타당성을 확보하기 위하여 2020년 구 비대 초기 생육 지표 예측모형을 2021년 자료에 그대로 적용하여 연도별 회귀계수를 비교하였다. 분석 결과 각 설명 변수의 연도별 회귀계수의 크기가 통계적으로 무차별한 것으로 나타났으며, 특히 양파 구중 결정에 주요인으로 알려져 있는 엽수의 경우 회귀계수의 부호 및 크기가 매우 유사한 것으로 분석되었다. 더하여 예측모형의 정확도를 검증하기 위해 2020년 자료를 바탕으로 구성된 예측모형에 2021년에 자료를 적용한 결과, 90% 이상의 예측력을 갖는 것으로 나타났다.

이상의 연구 결과는 다음과 같이 활용 가능하다. 우선 구 비대 초기(5월 초) 생육 지표를 수확기 구중 예측모형에 적용하여 산출한 예측치를 단위당 수확량으로 환산한 후, 금년 시작된 양파 의무경작신고제 면적에 적용한다면 현행보다 좀 더 이른 시점에 전국 양파 수확량 예측치를 산출할 수 있으며, 이를 평년 소비량과 비교하여 초과 공급 및 수요를 판단한 후 수급 대책 수립 여부를 결정할 수 있다. 이후 확보되는 기상 변수를 해당 모형에 차차 적용한다면 시간의 흐름에 따라 좀 더 정확한 예측치를 확보할 수 있을 것이며, 이 과정 중 정책 당국은 수급 대책 시행 여부를 최종 결정할 수 있다. 더하여 전술한 과정에서 엽 신장기(4월 초)의 생육 지표를 이용하여 산출한 구 비대 초기 지상부 예측치를 적용한다면, 비록 그 예측 정확도가 구 비대 초기 생육 지표를 이용한 구중 예측치보다 낮더라도, 수확기 구중 예측치를 한 달 정도 미리 확보할 수 있을 것이며, 이는 농가의 경영 판단 및 정부 정책 수립에 기초 자료로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 우선 예측 대상을 중만생종 양파의 구중으로 한정하여 시장 물량의 일정 수준을 담당하고 있는 조생종 양파에 대하여 다루지 못하였다. 더하여, 자료 확보의 한계로 인해 구중 결정의 주요인 중 하나인 토양 정보를 모형에 포함하지 못하였으며 본 연구의 시행 시

기와 2021년 수확기 실측 자료의 발표 시기가 부합하지 않아 해당 조사 결과를 연구에 반영하지 못하였다. 이에 해당 한계는 차후의 연구 주제로 남긴다. 본 연구가 미약하게나마 안정적인 양과 수급 달성에 기여할 수 있기를 바란다.

참고 문헌

- 강상진. 2016. 『다층모형』. pp. 41-104. 학지사.
- 강윤정, 나명환, 조완현, 고현석. 2021. “양파의 생구무게 예측을 위한 여러 가지 일반회귀모형의 성능 비교.” 『한국자료분석학회지』 23(1): 135-148. <http://doi.org/10.37727/jkdas.2021.23.1.135>
- 김대준, 김수옥, 김진희, 윤은정. 2019. “농장맞춤형 농업기상정보 생산을 위한 소기후 모형 구축.” 『한국농림기상학회지』 21(3): 146-157.
- 김대준, 김진희, 노재환, 윤진일. 2012. “신 기후변화시나리오에 따른 한반도 내 겨울보리 재배적지 이동.” 『한국농림기상학회지』 14(4): 161-169. <http://doi.org/10.5532/KJAFM.2012.14.4.161>
- 김대준, 윤진일. 2013. “기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 2. 강수량 분포 상세화.” 『한국농림기상학회지』 15(3): 171-177. <http://doi.org/10.5532/KJAFM.2013.15.3.171>
- 김승호, 윤진일. 2016. “하늘상태와 음영기복도에 근거한 복잡지형의 일조시간 분포 상세화.” 『한국농림기상학회지』 18(4): 233-241. <http://doi.org/10.5532/KJAFM.2016.18.4.233>
- 김재휘, 최성천, 김준기, 서홍석. 2021. “양파의 생육시기별 생육요인과 기상요인 간의 관계 탐색.” 『한국농림기상학회지』 23(1): 1-14.
- 김준기, 최성천, 김재휘, 서홍석. 2020. “다층모형을 활용한 양파 구중 추정 연구.” 『응용통계연구』 33(6): 763-776.
- 오승원, 김민수. 2017. “공간 및 기상정보 시계열 모형을 이용한 양파 생산량 예측.” 『한국자료분석학회』 19(5): 2447-2456. <http://doi.org/10.37727/jkdas.2017.19.5.2447>
- 윤진일. 2009. “지형보정계수를 이용한 복잡지형의 일 적산일사량 분포 추정.” 『한국농림기상학회지』 11(1): 13-18.
- 이승인, 손찬수, 이해림. 2020. “기상 및 영농투입재 비용이 양파 단수에 미치는 영향: 패널회귀분석과 베이지안네트 워크모형을 중심으로.” 『농촌경제』 43(2): 1-28. <http://doi.org/10.36464/jrd.2020.43.2.001>
- 이종태. 2015. 『양파: 한살이부터 유기농, 무경운 재배법까지』. pp. 430-431. 들녘.
- 정인철. 2019. “양파 재배면적과 생산단수의 예측 모형 비교 Stepwise, LASSO, PCA, PLS 방법의 비교.” 전남대학교 이학석사학위 논문.
- 최성천, 백장선. 2016. “공간 패널 회귀모형을 이용한 양파 생산량 추정.” 『응용통계연구』 29(5): 873-885.
- Bell, B., M. Ene, W. Smiley, J. Schoeneberger. 2013. “A Multilevel Model Primer Using SAS.” University of South Carolina.
- Emma Erler. 2020. “How do I get my onions to grow bigger?” University of New Hampshire.
- 농산물 유통정보(KAMIS). 양파 도소매가격. <<https://www.kamis.or.kr/customer/price/product/period.do>>. 검색일: 2021. 6. 8.
- 농촌진흥청. 2018. 『농업기술길잡이 양파』. <<https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psb/psbx/cropEbookLst.ps?menuId=PS65290&stdPrdlstCode=VC&sStdPrdlstCode=VC041201#>>. 검색일: 2021. 8. 6.
- 농촌진흥청. 농업날씨. <<http://weather.rda.go.kr/weatherMap.jsp>>. 검색일: 2021. 5. 24.
- 통계청. 농산물 생산조사. <http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/8/8/index.board>. 검색일: 2021. 8. 6.
- 통계청. 2021. 2021년 마늘, 양파 재배면적조사 결과. <https://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/8/9/index.board?bmode=read&aSeq=389254>. 검색일: 2021. 8. 6.
- 한국농촌경제연구원. 생육조사정보. <<https://oasis.krei.re.kr/gis/observationResultSearch/selectGrowthList.do>>. 검색일: 2021. 6. 5.

한국농촌경제연구원. 2021. 『농업전망 2021』. <<https://aglook.krei.re.kr/jsp/pc/front/prospect/eventDataList.jsp>>. 검색일: 2021. 8. 6.

원고 접수일: 2021년 7월 14일
원고 심사일: 2021년 7월 19일
심사 완료일: 2021년 9월 21일