

지역별 기후변화에 따른 토마토 황화잎말림병 피해 분석

윤지윤 · 김소윤 · 김관수 · 김홍석 · 안동환
서울대학교 농경제사회학부

An Analysis of TYLCV Damages under Regional Climate Changes

Yoon, Jiyeon · Kim, Sooyoon · Kim, Kwansoo · Kim, Brian H.S. · An, Donghwan
Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University

ABSTRACT : The purpose of the research is to analyze damages of TYLCV (Tomato Yellow Leaf Curl Virus) in the context of climate changes and to find the spatial distribution of the damages and characteristics of regions. A TYLCV is generally known for a plant disease related to temperature. Its occurrence rate increases when temperature rises. This disease first occurred in 2008 and rapidly spread nationwide. Due to the spread of a TYLCV, a number of Tomato farms in Korea were damaged severely. To analyze damages of the pest in the context of climate changes, this research estimated production loss under the current situation and RCP scenarios. Additionally, Hot Spot Analysis, LISA, and Cluster analysis were conducted to find spatial distribution and properties of largely damaged regions under RCP scenarios. The results explained that additional production loss was estimated differently by regions with the same temperature rising scenario. Also, largely damaged regions are spatially clustered and factors causing large damages were different across regional cluster groups. It means that certain regions can be damaged more than others by diseases and pests. Furthermore, pest management policy should reflect the properties of each region such as climate conditions, cultivate environment and production technologies. The findings from this research can be utilized for developing rural management plans and pest protection policies.

Key words : Climate Change, TYLCV, Pest Management, Spatial Analysis, Cluster Analysis

1. 서 론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 제5차 보고서를 통해 지난 133년(1880-2012) 동안 지구 평균 온도가 0.85°C 상승하였으며 현재와 같은 추세로 온실가스를 배출할 경우, 21세기말 기온은 약 3.7°C 높아질 것이라 발표하였다(IPCC, 2014). 전 세계적으로 기후변화가 진행됨에 따라 기후변화는 생태계를 비롯하여 농업, 해양, 산업 및 에너지, 보건, 인간 정주 공간 등에 영향을 미치고 있다. 그 중 농업은 기후조건의 영향이 매우 큰 분야로 기후변화가 발생할 경우 작물의 적지, 적기, 생산량 등이 변하고, 나아가 한 지역의 농업 형태가

지 변화될 수 있다(환경부, 2014; Howden et al., 2007). 특히 주변 환경의 온도에 영향을 받는 해충은 기온상승 시 발생개체가 증가하고 활동성이 활발해지기 때문에 병해충의 발생을 증가시키고 농업에 대한 피해를 증가시킨다. 더욱이 다른 지역으로 확산될 경우 그 피해는 더욱 커질 수 있다(Porter et al., 1991; Rosenzweig et al., 2001). 또한 기후변화로 인한 병해충의 발생 증가는 토마토를 비롯한 시설작물 재배에도 영향을 미칠 수 있다. 이는 시설 내 방제를 하더라도 시설 밖에서 유입되는 해충을 방지하기가 쉽지 않으며, 기후변화로 해충의 번식과 활동이 활발해질 경우 시설 내 유입밀도가 증가하고 병해가 확산되어 피해가 집중될 수 있기 때문이다.

추가적으로 병해충의 발생은 농약과 같은 화학물질의 사용을 증가시켜 건강과 생태계를 악화시키고 경제적 비용을 발생시켜 추가적인 피해를 야기하기도 한다.

Corresponding author : An, Donghwan
Tel : 02-880-4729
E-mail : dha@snu.ac.kr

한편 기상현상은 지형, 지리적 위치, 해양의 영향을 받기 때문에 지역이 위치한 특성에 따라 기온상승의 폭이 다르게 나타난다. 특히 우리나라는 전체 면적에 비해 지형이 복잡하기 때문에 지역별로 기온 차이가 발생하고, 이러한 차이는 농업에 대해 지역마다 다른 영향을 미치게 된다(이승호 외, 2008; 허인혜, 2006; Xu et al., 2008). 이러한 이유로 앞으로의 병해충 문제에 대비하기 위해서는 지역별 기후변화로 인한 병해충 피해분석이 선행되어야 하나, 기후변화 하에서의 병해충으로 인한 생산량 감소 등에 대한 연구는 부족한 실정이다(Scherm, 2004).

국내에서 기후변화와 농업에 관한 연구들은 과거의 데이터를 바탕으로 기후변화와 병해충 피해에 대한 영향 관계를 주로 다루고 있다(이승호 외, 2008; 정학균 외, 2014). 또한 미래 기후변화 시나리오 하에서 병해충을 고려하지 않거나 잡초 및 병충해와 같은 억제요인은 완벽하게 방제된다는 가정 하에서의 생산성 변화에 주로 초점을 맞추고 있어 기후변화를 고려한 병해충 발생 및 이와 연계된 생산성 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다(김명현 외, 2013; 박정원 외, 2015; 환경부, 2011).

최근 국내에서는 벼 줄무늬잎마름병, 토마토 황화잎말림바이러스, 꽃매미, 미국선녀벌레 등의 병해충이 돌발적으로 발생하여 생산량 감소, 품질 저하와 같은 피해가 커지고 있다(심홍식 외, 2012). 그 중 본 연구에서 주목하는 분석대상인 황화잎말림병(Tomato Yellow Leaf Curl Virus, TYLCV)은 황화, 잎말림, 위축 등의 피해를 일으켜 수확을 불가능하게 만들기 때문에 토마토에 치명적인 위험한 병이다(고숙주 외, 2014; 김창석 외, 2012). 특히, 황화잎말림병은 농작물에 미치는 피해가 크기 때문에 세계적으로 이동이 금지되었으며, 국내에서는 2008년 경남 통영의 토마토 농가에서 처음 발견된 이후 4년 만에 전국 62개 지역으로 급속히 확산된 것으로 보고되고 있다(김정수 외, 2011). 한편 황화잎말림병은 담배가루이(*Bemisia tabaci*)에 의해서 매개되는데, 최초 발생 이후 담배가루이의 이동에 따라 분포와 피해가 계속해서 확산되고 있는 실정이다. 담배가루이의 발육과 생식에 있어서 온도가 중요한 영향요소인 만큼 지속적으로 기온상승이 진행되고 있는 현재 시점에서 담배가루이로 인한 황화잎말림병의 피해에 대한 대응전략이 필요하다.

이러한 선행연구의 한계점 및 기후변화를 고려한 병해충 대책연구 현황을 감안하여, 본 연구에서는 기후변화에 따른 병해충 피해에 효과적으로 대응하기 위한 기초자료로서 기온상승 시나리오에 따른 토마토 황화잎말림병의 피해를 분석한다. 특히 본 연구에서는 지역별 기후변화 양상이 다르다는 점에 착안하여 병해충 피해의

공간분석을 추가적으로 시행한다. 이를 위한 구체적인 분석과정은 다음과 같다. 먼저 기후변화에 따른 토마토 황화잎말림병의 피해정도를 파악하기 위하여 현재와 RCP8.5 시나리오 하에서의 미래 피해량을 산출하였다. 나아가 추정된 피해량을 활용한 공간분석을 시도함으로써 토마토 황화잎말림병으로 인한 피해량 증가가 높은 지역의 군집양상을 살펴보고, 군집분석을 통해 피해량 증가가 높은 지역들의 특성을 분석하였다. 이러한 연구 결과는 향후 기후변화 하에서의 지역별 농촌계획 및 돌발병해충 대응정책 수립 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 자료 및 방법

1. 기후자료 및 토마토 생산 관련 자료

본 연구는 기후변화에 따른 토마토 황화잎말림병 피해를 산출하기 위해 기온자료와 황화잎말림병 피해자료, 토마토 재배면적 및 단수 등의 자료를 사용하였다. 기온 자료의 경우, 기상청에서 발간한 한반도기후변화전망보고서를 바탕으로 RCP8.5 시나리오¹⁾에 해당하는 각 시군구의 전반기(2040년도 까지) 온도상승분을 적용하였다.

황화잎말림병을 매개하는 담배가루이는 20°C~25°C의 범위에서 왕성한 번식과 활동을 하기 때문에, 이를 고려하여 일 최고기온의 평균값을 활용하였다. 황화잎말림병 발생현황은 농촌진흥청 재해대응과로부터 제공받은 전국 광역시도별 발병 자료를 활용하였다.

지역별 발병 자료를 바탕으로 피해 현황을 살펴본 결과, 전국적으로 24,309 톤의 피해가 발생하고 있으며, 시군구별로 살펴볼 경우 최대 1,782톤의 피해가 나타나고 있었다. 이는 발병 자료에 피해 산출식을 적용하여 피해 현황을 분석한 결과이다. 피해 산출에 적용한 토마토의 재배면적과 단수는 2010년에서 2013년의 평균값을 적용하였으며, 이는 토마토 재배면적과 생산성의 변동폭을 보완하기 위함이다.

2. 담배가루이와 황화잎말림병 피해 산출

기후변화로 인한 황화잎말림병의 피해를 산출하기 위해서 다음의 두 단계를 고려하였다. 먼저, 황화잎말림병을 매개하는 담배가루이의 발생은 온도가 높아질수록 번식이 활발해지는 점을 이용하여 온도에 따른 담배가루이 개체수를 산출하였다. 다음으로는 증가한 담배가루이 개체수에 의해 황화잎말림병에 감염된 토마토 수량을 산

출하였다. 본 연구에서는 온도 증가에 따른 토마토황화 잎말림병 피해수량을 계산하기 위해 Rahman et al.(2006)에 의해 제시된 아래의 두 관계식을 활용하였다. 먼저 식 (1)은 온도 증가와 담배가루이 개체 수의 관계를 제시하고 있으며, x 는 온도(°C)이고 y 는 담배가루이 개체수이다.

$$y = \exp(-0.0059x^2 + 0.2826x - 1.5378) \quad (1)$$

다음으로 식 (2)는 담배가루이 개체수와 황화잎말림병 감염량 관계를 나타낸 식이며, 여기서 y 는 담배가루이 개체수이고, z 는 감염 토마토 그루수이다.

$$z = \exp(-0.0002y^2 + 0.0297y + 1.0626) \quad (2)$$

위 과정을 통해 기온 상승 시 감염 토마토와 현재 감염 토마토 그루 수를 추정한 후, 이를 다음 식 (3)에 이용하면, 온도 증가에 따른 감염률 상승분을 구할 수 있다.

$$\hat{z} = \frac{INF' - INF}{INF} \times 100 \quad (3)$$

여기서 \hat{z} 은 감염률 상승분이며, INF'는 상승한 온도에서의 감염 토마토 그루 수이고, INF는 현재 온도에서의 감염 토마토 그루 수이다. 이 식을 이용하여 온도 상승시의 황화잎말림병 감염률(%)을 구하고, 이를 피해수량 산출식인 식 (4)에 적용하여 기온 상승 시 피해를 추정하였다.

$$L = A \cdot IR \cdot PR \cdot Lo \quad (4)$$

여기서 L 은 황화잎말림병으로 인한 피해량(톤)이며, A 는 피해재배면적(10a)으로 지역별 피해자료들 바탕으로 하였으며, IR 은 앞서 식 (3)을 통해 구한 감염률 상승분(%)이다. 또한, PR 은 2011년부터 2013년까지의 평균단수(톤/10a)로 통계연보를 바탕으로 하였으며, Lo 는 황화잎말림병 감염 시 감소 수량(톤)으로 선행연구(원도연, 2012)의 추정치를 활용하였다.

본 연구에서는 전국 시군구 단위의 황화잎말림병 발병 자료를 토대로 감염지역의 토마토 재배 면적과 지역별 토마토 단수 자료를 이용하여 시군구 단위 토마토 생산량을 추정하고, 이에 앞서 고려한 황화잎말림병 감염률을 적용하여 최종적으로 기온 상승에 따른 토마토 피해 수량을 추정하였다.

3. 공간분석방법

피해 지역의 공간적 특성과 분포를 Hot Spot 분석과 LISA(Local Indicator of Spatial Association) 분석을 통해 살펴보았다. Hot Spot 분석은 각 연구 개체들의 Getis-ord G_i^* 를 계산하고, 군집정도를 파악하여 클러스터를 이루고 있는 지역들 가운데 큰 값들의 클러스터와 작은 값들의 클러스터를 구분하여 핫스팟(Hot Spot)과 콜드스팟(Cold Spot)을 찾을 수 있는 방법이다. 이 때, G_i^* 는 개체의 z-score를 계산한 값으로 다음의 식 (5)와 같이 계산된다.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}r_j - \bar{r} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (5)$$

위 식에서 r_j 는 j 지역의 속성으로 본 연구에서는 각 지역의 피해량 증가분에 해당하고, s 는 지역 속성 r 의 표준편차를 의미한다. 또한 w_{ij} 는 개체 i 와 j 간의 공간가중치를 의미하고 n 은 지역의 개수이다.

LISA 분석은 국지적 모란지수(Anselin Local Moran's I)를 사용하여 인접 지역과의 유사성과 차이성을 구분하여 군집지역의 구분을 가능하게 하는 공간 분석 방법이다. 국지적 모란지수는 인접지역과 해당지역의 차이에 대한 표준화 값을 의미하며, 다음의 식 (6)과 같이 계산된다.

$$I = \frac{(Z_i - \bar{Z})}{S^2} \cdot \sum_{j=1}^n [w_{ij} \cdot (Z_j - \bar{Z})] \quad (6)$$

위 식에서 S^2 은 분산이고 Z_i 는 i 지역에서 발생하는 비율을 의미하며, w_{ij} 는 개체 i 와 j 간의 공간가중치를 의미한다. 국지적 모란지수를 통해 지수 값이 높은 지역들끼리 인접하거나(HH) 낮은 지역들끼리 인접하여(LL) 지역간 유사성이 존재하는 지역, 그리고 해당지역은 높지만 주변지역이 낮거나(HL) 해당지역이 낮으나 주변지역이 높아(LH) 지역간 차이성이 존재하는 지역을 정의할 수 있다.

III. 분석결과

1. 평균 및 지역별 기후변화 시나리오 적용의 차이

이번 연구에서는 한반도 기후평가 보고서를 참고하여 RCP 8.5 시나리오 중 2040년까지의 온도 상승분을 적용하여 분석하였다. 한국 기후변화 평가보고서(환경부, 2014)의 기후변화 시나리오 RCP 8.5에 따르면, 2000년대(2010-2100)의 전반기에 해당하는 2040년까지 일 최고기온의 전국평균은 1.4℃ 상승하는 것으로 추정된다. 이를 지역별로 보면 가장 낮게는 0.9℃ 상승에서 가장 높게는 1.7℃까지 상승하는 것으로 나타나, 지역별로 기후변화의 영향이 다를 수 있다(Figure 1). 특히 기온상승은 주로 동해와 남해에 접해있는 지역에서 크게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 주로 영서와 영남 내륙을 중심으로 기온이 크게 상승하였던 지난 30년(1981-2010)과는 다른 양상이다(기상청, 2012). 이러한 지역별 기온상승의 차이는 병해충 발생 피해 역시 지역별로 다르게 나타날 수 있음을 의미한다.

그러므로 일 최고기온의 전국 평균 상승폭인 1.4℃를 모든 지역에 적용할 경우, 지역별로 상이하게 나타나는 감염률을 피해 추정 시 고려하지 못하게 된다. 즉, 평균 기온 변화를 적용할 경우 황화잎말림병으로 인한 피해가 지역별로 과대추정되거나 과소추정될 수 있다. Figure 2는 지역별로 일괄적으로 일 최고기온이 1.4℃ 상승할 때의 피해추정치와 지역별로 온도상승폭을 다르게 적용했을 때의 피해추정치 차이의 분포를 나타낸 것이다. 이는 지역별로 온도상승 폭이 다르게 나타남에 따라 기온상승으로 인한 담배가루이 발병률과 황화잎말림병 감염률이 지역별로 어떻게 상이한지를 보여준다.

Figure 2에서 빨간색은 피해가 과대 추정된 지역으로

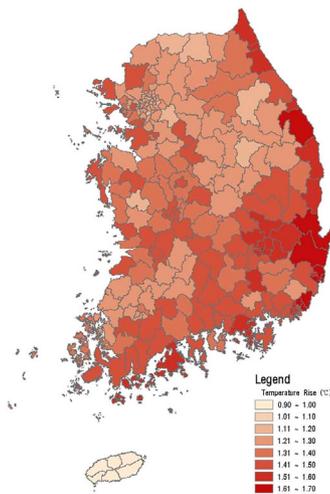


Figure 1. Temperature Increase by region in 2040

기온이 전국 평균(1.4℃)보다 낮게 상승하기 때문에 황화잎말림병 감염률이 낮아져 피해도 작아질 것으로 예상된다. 한편 파란색은 피해가 과소 추정된 지역으로 기온이 전국 평균보다 높게 상승하여 황화잎말림병 감염률이 평균에 비해 높고 예상피해도 커지는 지역을 나타낸다. 이와 같이 피해 과소추정지역이 주로 동해안에 분포하는 것은 Figure 1에서 동해안 지역을 중심으로 기온상승폭 차이가 크게 나타난 것과 일관된 분석 결과이다. 이와 같이 지역별로 온도 상승폭을 차등 적용하여 피해를 살펴볼 경우, 전국 평균 상승온도인 1.4℃를 일괄적으로 각 지역에 적용할 경우의 피해량 총합은 비슷하지만, 지역별 분포는 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다.

Table 1은 기온 상승을 전국평균으로 일괄적용 시 과대 추정되는 상위 10개 지역과 과소추정되는 상위 10개 지역을 나타낸다. 이에 따르면, 피해가 과대 추정된 지역의 경우 최고 52톤의 피해가 추가로 추정되며, 피해가 과소 추정된 지역의 경우 최고 33톤이 적게 추정되는 것으로 나타났다. 과대 추정 지역은 강원 춘천시, 강원 철원군, 충남 부여군, 충남 청양군, 강원 화천군 순으로 나타났으며, 과소 추정 지역은 경북 경주시, 경북 군위군, 부산 강서구, 경북 포항시, 경남 김해시의 순으로 나타났다.

위 결과를 통해 보다 엄밀한 기후변화에 의한 병해충 발생 피해를 분석하기 위해서는 지역별 온도 상승폭을 적용한 분석이 필요함을 알 수 있다. 즉, 기후 변화로 인한 병해충 피해에 보다 효과적이며 지속가능한 대응을 위해서는 전국 단위보다 시·군·구 등 지역 단위로 세분화하여 살펴보는 것이 필요할 것으로 사료된다.

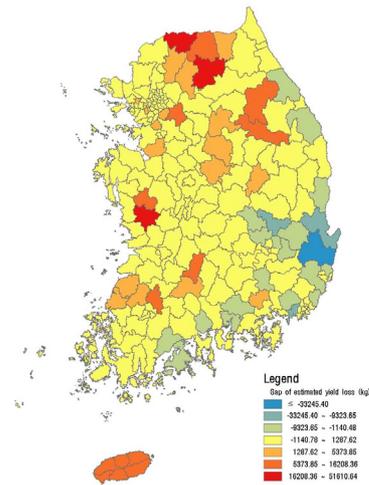


Figure 2. Estimation Bias in Production Losses due to Applying Average Climate Change Scenario

Table 1. Top Regions of Estimation Bias in Production Loss due to Applying Average Climate Change Scenario

Rank	Overestimation			Underestimation		
	Si-Do	Si-Gun-Gu	Bias (kg)	Si-Do	Si-Gun-Gu	Bias (kg)
1	Gangwon	Chuncheon	51,611	Gyeongbuk	Gyeongju	- 33,245
2	Gangwon	Cheorwon	32,831	Gyeongbuk	Gunwi	- 15,039
3	Chungnam	Buyeo	24,379	Busan	Gangseo	- 14,137
4	Chungnam	Chengyang	16,208	Gyeongbuk	Pohang	- 9,324
5	Gangwon	Hwacheon	13,668	Gyeongnam	Gimhae	- 5,371
6	Gyeonggi	Gwangju	12,255	Daegu	Seogu	- 4,766
7	Jeonnam	Damyang	8,510	Jeonnam	Boseong	- 4,763
8	Jeju	Jeju	7,602	Jeonnam	Goheung	- 4,265
9	Jeonbuk	Jangsu	7,006	Gyeongbuk	Gumi	- 2,546
10	Jeju	Seogwipo	6,364	Daegu	Dong-gu	- 1,855

주) Top 10 overestimated regions and underestimated regions

2. 기후변화로 인한 시기별 토마토 황화잎말림병 피해

Table 2에 따르면, 토마토 황화잎말림병으로 인한 현재의 피해량은 총 24,439톤이며, 강원 춘천시의 피해량이 1,782톤으로 가장 큰 것으로 추정되었고, 충남 부여군, 부산 강서구가 그 뒤를 잇는다. 현재의 총 피해량은 최근 4개년(2010-2013) 동안 토마토 평균 생산량(396,542톤)의 6.16%에 해당하는 수준이다. 2010년부터 2100년까지인 2000년대의 전반기에 해당하는 2040년까지 일 최

고기온이 상승하면 토마토 황화잎말림병으로 인한 피해는 30,576톤으로 증가하는 것으로 추정되며, 이는 1년 토마토 생산량의 7.71%에 해당한다. 일 최고기온 상승 시 강원 춘천시의 피해량은 2,424톤으로 현재와 같이 가장 많은 피해가 발생하며, 충남 부여군, 부산 강서구의 순으로 피해 발생량이 높은 것으로 나타났다. 현재의 피해량과 전반기 기온 상승에 따른 피해량이 많이 발생하는 지역의 순서는 크게 차이가 없으나, 전국적으로 피해량은 6,136톤 증가하며 이는 연간 생산량의 1.55%에 해

Table 2. Top 20 Regions of Production Loss by TYLCV

Rank	Production Loss under Current temperature			Production Loss under RCP Scenario			Production Loss Increases		
	Si-Do	Si-Gun-Gu	Loss (ton)	Si-Do	Si-Gun-Gu	Loss (ton)	Si-Do	Si-Gun-Gu	Loss (ton)
1	Gangwon	Chuncheon	1,782	Gangwon	Chuncheon	2,424	Gangwon	Chuncheon	642
2	Chungnam	Buyeo	1,724	Chungnam	Buyeo	2,100	Chungnam	Buyeo	376
3	Busan	Gangseo	1,462	Busan	Gangseo	1,739	Busan	Gangseo	278
4	Jeonnam	Hwasun	806	Jeonnam	Hwasun	986	Gangwon	Hoengseong	230
5	Chungnam	Nonsan	735	Gyeongbuk	Gyeongju	936	Gyeongbuk	Gyeongju	219
6	Gyeongbuk	Gyeongju	717	Chungnam	Nonsan	887	Jeonnam	Hwasun	180
7	Gyeongnam	Gimhae	675	Jeonnam	Damyang	803	Gangwon	Cheorwon	169
8	Jeonnam	Damyang	668	Gyeongnam	Gimhae	786	Chungnam	Nonsan	151
9	Jeonnam	Naju	605	Gangwon	Hoengseong	758	Gyeongbuk	Gunwi	139
10	Daejeon	Seogu	569	Jeonnam	Naju	699	Jeonnam	Damyang	135
11	Daegu	Seogu	569	Daejeon	Seogu	697	Daejeon	Seogu	127
12	Gangwon	Hoengseong	528	Daegu	Seogu	631	Gyeongnam	Gimhae	111
13	Gyeongbuk	Gunwi	479	Gangwon	Cheorwon	620	Chungnam	Chengyang	106
14	Jeonbuk	Iksan	471	Gyeongbuk	Gunwi	618	Chungnam	Gongju	100
15	Gangwon	Cheorwon	450	Jeonbuk	Iksan	564	Jeonnam	Naju	94
16	Chungnam	Chengyang	429	Chungnam	Chengyang	535	Jeonbuk	Iksan	93
17	Jeonnam	Boseong	411	Jeonnam	Boseong	500	Jeonnam	Boseong	89
18	Chungnam	Gongju	363	Chungnam	Gongju	463	Gyeongbuk	Gimcheon	88
19	Jeonnam	Jangseong	329	Jeonnam	Jangseong	395	Jeonbuk	Jangsu	87
20	Gyeongnam	Jinju	319	Gyeongbuk	Gimcheon	385	Chungbuk	Cheongwon	83
	National Total		24,439	National Total		30,576	National Total		6,136

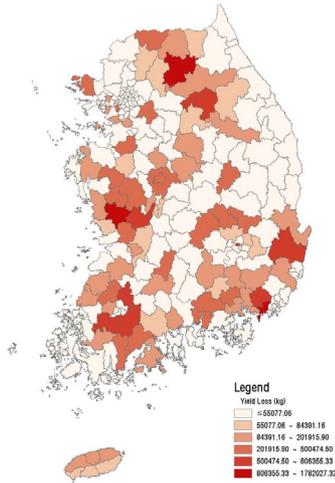


Figure 3. Regional Distribution of Current Production Loss

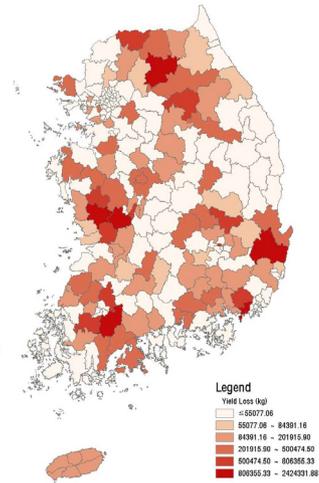


Figure 4. Regional Distribution of Production Loss under RCP Scenario (2040)

당하는 양이다. 피해량이 크게 증가하는 지역을 살펴보면 강원 춘천시가 642톤으로 가장 많이 증가하며, 충남 부여군, 부산 강서구, 강원 횡성군, 경북 경주시 순으로 높게 증가하는 것으로 나타났다.

현재와 전반기 기온상승 시에 발생하는 피해양상은 Figure 3 및 Figure 4와 같다. 본 연구에서는 토마토 재배지에 대한 변화가 일어나지 않음을 가정하고 있으므로 토마토 황화잎말림병 피해가 발생하는 지역의 위치는 큰 차이가 없으나, 현재에 비해 기온상승 시 피해의 정도가 더욱 심하며, 피해의 분포가 전국적으로 더욱 퍼져있는 것으로 분석되었다.

3. 토마토 황화잎말림병 피해증가의 공간적 분석

전반기 기온상승 시 토마토 황화잎말림병에 의한 지역별 피해 증가량을 바탕으로 핫스팟 분석과 LISA 분석을 사용하여 분석한 결과는 Figure 5 및 Figure 6과 같다. 먼저 핫스팟 분석을 살펴보면, 크게 세 지역군에서 피해가 큰 지역군인 핫스팟(Hot Spot)으로 나타남을 알 수 있다. 핫스팟(Hot Spot)은 강원 춘천시, 횡성군, 홍천군 일대와 충남 부여군, 보령군 일대, 경북 경주시에 해당하는데, 해당지역들은 Table 2에서 피해 증가량이 큰 상위 20개 지역에 포함된다. 한편 콜드스팟(Cold Spot)은 경기도

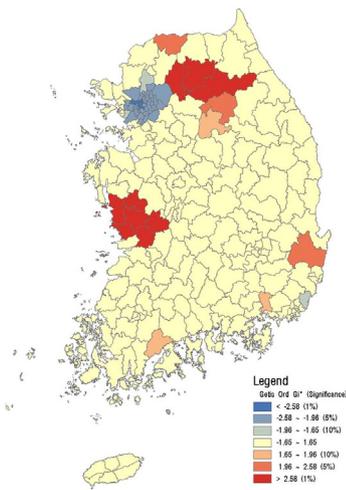


Figure 5. Hotspot of Production Loss Increases

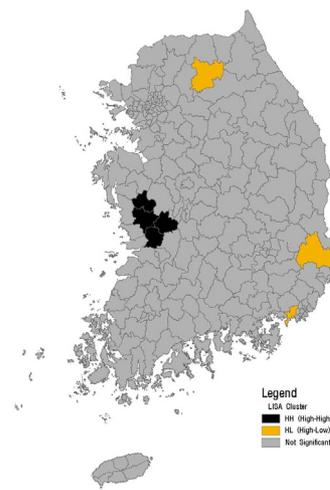


Figure 6. LISA of Production Loss Increases

와 서울시 일대가 해당하는데, 이 지역들은 타 지역에 비해 온도상승폭이 크지 않으며 토마토 재배가 많이 이루어지지 않기 때문에 황화잎말림병 피해 증가량이 작은 것으로 해석된다.

LISA분석의 경우 크게 세 지역군에서 통계적으로 유의한 공간군집성이 존재하는 것으로 나타났다. 강원 춘천시와 경북 경주시, 부산 강서구 등은 HL 지역군이며, 이는 해당 지역은 피해 증가가 크지만 주변 지역은 피해 증가가 적은 지역을 의미한다. 한편 충남 청양군, 부여군, 논산시와 전북 익산시 등의 경우 HH 지역군으로 주변 지역과 해당지역 모두 피해 증가가 큰 지역군으로 해석된다.

핫스팟 분석에서 핫스팟으로 분류된 지역군들과 LISA 분석에서 군집성이 나타난 지역군들은 비슷한 양상의 공간적 분포를 보인다. 하지만 핫스팟으로 분류된 지역군들이더라도 인접지역과의 유사성 혹은 차이성에 따라 다른 특성을 가진다. LISA분석에서 HH지역으로 나타난 충남지역 일대는 해당지역과 주변지역 모두 피해 증가량이 크기 때문에 지역 간의 협력을 통한 방제활동을 진행할 필요가 있다. 한편 HL지역으로 나타난 경우, 해당지역은 피해 증가량이 크지만 주변지역은 피해 증가량이 작기 때문에 주변지역으로 피해가 확산되지 않도록 집중해서 대비할 필요가 있다.

4. 군집분석 결과 및 분석

토마토 황화잎말림병에 의한 피해량 증가가 높은 지역의 특성을 살펴보기 위해 피해량 산출에서 고려된 재배면적, 생산성, 온도상승폭을 변수로 군집분석을 실시하였다. 계층적 군집방법 중 평균연결법에 따라 토마토 황

화잎말림병에 의한 피해량 증가가 높은 상위 50개 지역에 대해 군집분석을 실시한 결과, Table 3과 같이 4개의 군집으로 나누어지는 것으로 나타났다.

군집1은 부산 강서구, 강원 춘천시, 충남 부여군을 포함하는 군집으로 토마토 주산지로서 잘 알려진 지역이다. 해당 지역은 온도상승 폭은 낮음에도 불구하고 토마토 재배면적이 넓기 때문에 황화잎말림병 감염 시 피해량 증가가 높게 나타난다. 군집2는 대구 서구, 전남 고흥군, 경북 경주시와 포항시, 군위군을 포함하는 군집으로 타 지역에 비해 온도상승폭이 높은 특징을 가지고 있다. 전반기(2010-2040)의 기온상승이 동해와 남해에 접한 지역을 중심으로 기온이 상승한다는 점을 감안해볼 때, 고흥군과 경주시, 포항시는 동해와 남해에 접해있는 지역이기 때문에 이러한 특징을 가지고 있는 것으로 해석된다. 한편 대구 서구와 경북 군위군의 경우, 분지형태의 지형으로 인해 온도상승폭이 높게 나타난다. 군집3은 전남 장흥군과 경남 김해시를 포함하는 군집으로 다른 군집에 비해 토마토 재배면적은 작지만 생산성이 높은 지역이다. 생산성이 높은 경우 작은 재배면적에서도 많은 양의 토마토 생산이 가능하기 때문에 기온이 크게 증가하지 않더라도 황화잎말림병에 감염될 수 있는 토마토의 수량이 많아지는 것이다. 군집4는 다른 군집에 비해 재배면적이나 생산성, 온도 상승폭이 크지 않은 지역들이다. 이 지역들은 복합적인 요인으로 인해 기온 상승 시 피해량 증가가 큰 지역군으로 해석될 수 있다.

이러한 군집결과는 기후변화 발생 시 지역별로 병해충의 피해를 증가시키는 요인이 다르기 때문에 병해충의 대비책 또한 다르게 마련될 필요가 있음을 의미한다. 예를 들어, 군집 1에 속한 지역의 경우, 온도 상승폭이 비

Table 3. Results of Cluster Analysis

Cluster	Cultivate area of Tomato (ha)	Unit (kg/10a)	Temperature rise (°C)	Region	
				Si-Do	Si-Gun-Gu
Cluster1	328.5	6,544.9	1.37	Busan	Gangseo
				Gangwon	Chuncheon
				Chungnam	Buyeo
Cluster2	72.5	7,556.9	1.64	Daegu	Seo
				Jeonnam	Goheung
				Gyeongbuk	Gyeongju, Pohang, Gunwi
Cluster3	55.8	10,724.4	1.45	Jeonnam	Jangheung
				Gyeongnam	Gimhae
Cluster4	57.4	6,211.7	1.35	the Others (40 regions)	
Average ¹⁾	75.1	6,546.7	1.39		

1) Average statistics of top 50 largely damaged regions

교적 낮으나 토마토 재배면적이 다른 지역에 비해 넓은 특징이 있으므로 넓은 범위의 방제를 통해 병해충의 확산을 막는 것이 효과적일 것이다. 한편 군집 2에 속한 지역의 경우는 온도 상승폭이 크기 때문에 기온상승에 대비한 계획이 요구된다. 이와 같이, 기후 변화로 인한 병해충 피해에 보다 효과적으로 대응하기 위해서는 지역에 따라 각 지역의 작물 재배 특성과 기후조건을 고려하여 대비책을 마련하는 것이 필요함을 알 수 있다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기후변화로 인한 병해충 피해에 효과적으로 대응하기 위해 기온의 지역별 상승을 고려한 토마토 황화잎말림병의 피해 정도를 분석하고, 피해 지역의 공간적 분포와 특성을 살펴보았다. 기후변화로 인한 피해 정도를 세분화된 지역 단위로 살펴보기 위하여 시군구별 온도 상승폭을 적용하여 현재와 전반기(2010-2040) 기온 상승시의 황화잎말림병 피해량을 시군구 단위로 산출하였다. 현재 강원 춘천시, 충남 부여군, 부산 강서구에서 가장 많은 황화잎말림병 피해가 발생하였고, 기온 상승 시 세 지역에서 가장 많은 피해가 발생하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 핫스팟 분석과 LISA 분석을 통해 피해량 증가의 공간적 분포를 살펴보았으며, 그 결과 피해량 증가가 가장 많았던 강원 춘천시, 충남 부여군, 부산 강서구를 중심으로 공간군집성이 존재하는 것으로 나타났다. 피해량 증가 정도가 군집되어 나타나는 지역의 특성을 살펴보고자 군집분석을 한 결과, 토마토 재배 면적과 생산성, 기온 상승폭에 의하여 피해량 증가가 많은 상위 50개 지역은 4개로 구분되었다. 군집 1은 기온 상승폭은 작으나 토마토 재배면적이 넓은 토마토 주산지이고, 군집 2는 기온상승폭이 높은 지역이며, 군집3은 생산성이 좋아 토마토 생산이 많이 이루어지는 지역이다. 한편 군집 4는 복합적인 요인으로 인해 피해량 증가가 많은 지역으로 해석된다.

기후변화가 진행됨에 따라 증가하는 황화잎말림병의 피해를 분석한 결과, 공간적으로 군집 분포를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 지역별로 피해 발생 정도가 다르게 나타나고, 이러한 지역별 피해 차이는 지역 특성과 공간적 분포, 지역의 토마토 재배 양상에 기인하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화 시나리오 하에서 특정 지역은 기후변화로 인한 병해충 피해에 더 취약할 수 있고, 이에 따른 손실이 지역 경제에 더 민감하게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 기온 상승이 발육과 생식에 중요한

영향을 미치는 담배가루이는 황화잎말림병을 매개하고, 이 병해는 국내 토마토 농가에 상당한 생산 손실을 입고 있다. 기후변화로 인한 기온 상승 시 이러한 병해충에 의한 피해가 증가할 수 있어 이에 대비할 수 있는 정책적 노력이 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구결과는 기후변화로 인해 발생하는 돌발 병해충에 대응하는 지역 단위의 정책 수립에 있어 기초 자료로 활용될 수 있다.

본 연구의 한계로는 토마토 재배면적의 추이가 앞으로 동일할 것으로 가정한 점과 토마토 생산 기술 발전으로 인한 생산성 향상(단수 증가 등)을 고려하지 못한 점을 들 수 있다. 이는 토마토 재배 면적이 2000년 이후 변동 폭이 컸으며, 자료의 한계로 분석 지역 단위별 토마토 재배면적의 과거 자료를 확보하는 데에 어려움이 있었기 때문이다. 또한, 이번 연구에서 적용한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5외에도 추가적인 기후변화 시나리오를 고려하여 병해충 피해를 분석한다면 여러 상황의 기후변화에 대응하는 데 있어 보다 많은 시사점을 찾을 수 있을 것으로 여겨진다. 이와 더불어, 기후변화는 작물의 생산지 및 재배가능면적에도 영향을 미치는 만큼, 후속 연구에서 이 점을 보완하여 기후변화 하에서의 토마토 생산면적의 추정값을 적용한다면 보다 정확한 분석이 가능할 것으로 생각된다.

주1) RCP(Representative Concentration Pathways, 대표농도경로) 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서에서 사용된 온실가스 농도전망 기법으로서 RCP 4.5 및 8.5시나리오에서 미래 온실가스 증가가 2100년경 지구기후 시스템에 각각 4.5, 8.5 W/m²의 직접적 온실효과를 유발한다고 가정됨(한반도 기후변화 전망보고서, 기상청).

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ009561)에 의해 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음.

References

1. Heo, I. H., 2006, The Distribution of Regional Unusual Temperature in Korea, Journal of the Korean Association of Regional Geographers, 12(4), 461-474.
2. Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., and Meinke, H., 2007, Adapting agriculture to climate change, Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50),

- 19691-19696.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Climate Change 2013–The Physical Science Basis (Fifth Assessment Report).
 4. Jeong, H. K., Kim, C. G., and Moon, D. H., 2014, An Analysis of Impacts of Climate Change on Rice Damage Occurrence by Insect Pests and Disease, The Korean Society of Environmental Agriculture, 33(1), 52-56.
 5. Kim, C. S., Lee, K. S., Choi, H. S., Lee, K. Y., Lee, S. C., Kim, J. K., Lee, J. H., Goh, H. G., Lee, J. R., and Lee, I. Y., 2012, Weed Host for Propagation of the Bemisia tabaci infected with TYLCV and Its TYLCV Infection, The Korean Journal of Weed Science, 32(2), 247-248.
 6. Kim, J. S., Lee, S. H., Choi, H. S., Kim, M. K., Kwak, H. R., Nam, M., Kim, J. S., Choi, G. S., Cho, J. D., Cho, I. S., and Chung, B. N., 2011, Occurrence of Virus Diseases on Major Crops in 2010, Research in Plant Disease, 17(3), 334-341.
 7. Kim, M. H., Bang, H. S., Na, Y. E., Kim, M. R., Oh, Y. J., Kang, K. K., and Cho, K. J., 2013, Vulnerability Assessment of Rice Production by Main Disease and Pest of Rice Plant to Climate Change, Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology, 16(1), 147-157.
 8. Ko, S. J., Choi, D. S., Ma, K. C., Kim, D. I., Kim, M. K., Choi, H. S., and Kim, H. W., 2014, Pattern of the Occurrence of Tomato yellow leaf curl virus on Cultivation, Research in Plant Disease, 20(4), 303-306.
 9. Korea Meteorological Administration, 2012, Korea Climate Change Report.
 10. Lee, S. H., Kim, S. Y., 2008, Impacts of Climate change on Highland Agriculture over Taebak Mountainous Region, The Geographical Journal of Korea, 42(4), 621-633.
 11. Ministry of Environment, 2011, Economic Analysis of Climate Change in Korea.
 12. Ministry of Environment, and National Institute of Environment Research, 2014, Korean Climate Change Assessment Report 2014.
 13. Park, K. W., Kwon, O. S., and Kim, K. S., 2015, The Regional Impacts of Climate Change on Korean Agriculture: A Positive Mathematical Programming Approach, The Korean Economic Review, 63(1), 61-91.
 14. Porter, J. H., Parry, M. L., and Carter, T. R., 1991, The potential effects of climatic change on agricultural insect pests, Agricultural and Forest Meteorology, 57(1), 221-240.
 15. Rahman A. H. M. A., Akanda, A. M., and Alam, A. A., 2006, Relationship of Whitefly Population Build up with the Spread of TYLCV on Eight Tomato Varieties, Journal of Agriculture & Rural Development, 4(1&2), 67-74.
 16. Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X. B., Epstein, P. R., and Chivian, E., 2001, Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests., Global Change & Human Health, 2(2), 90-104.
 17. Shim, H. S., Myung, I. S., Hong, S. G., Lee, Y. G., Lee, S. G., Lee, G. S., Park, H. H., Choi, H. S., Goh, H. G., 2012, Outbreak Species of Crop(Viral)Disease and insects occurrence and damage by climate changes, 2012 Annual Meeting on The Korean Society Of Pesticide Science, 2012(11), 11-18.
 18. Scherm, H., 2004, Climate change: can we predict the impacts on plant pathology and pest management?, Canadian Journal of Plant Pathology, 26(3), 267-273.
 19. Won, D. Y., 2012, Occurrence and damage of Tomato yellow leaf curl virus disease, Master's Dissertation.
 20. Xu, Z. X., Gong, T. L., and Li, J. Y., 2008, Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau—regional temperature and precipitation, Hydrological Processes, 22(16), 3056-3065.
-
- Received 4 November 2015
 - First Revised 21 November 2015
 - Finally Revised 2 December 2015
 - Accepted 2 December 2015