

감자역병 진전도 예측모형 작성

안재훈* · 함영일 · 신관용
고령지농업시험장

Modeling for Prediction of Potato Late Blight (*Phytophthora infestans*) Progress

Jae-Hoon Ahn*, Young-Il Hahm and Kwan-Yong Shin
Alpine Agricultural Experiment Station, RDA, Pyongchang 232-950, Korea

ABSTRACT: To develop the model for prediction of potato late blight progress, the relationship between severity index of potato late blight transformed by the logit and Gompit transformation function and cumulative severity value (CSV) processing weather data during growing period in Taegwallyeong alpine area, 1975 to 1992 were examined. When logistic model and Gompertz model were compared by determining goodness of fit for progressive degree of late blight using CSV as independent variable, the coefficients of determination were higher as 0.742 in the logistic model than 0.680 in the Gompertz model. Parameters in logistic model were composed of progressive rate and initial value of logistic model. Initial value was calculated in -3.664. The progressive rate of potato late blight was 0.137 in cv. Superior, 0.136 in cv. Irish Cobbler, and 0.070 in cv. Jopung without fungicide sprays. According to increase of the number of spray times the progressive rate was lowered, was 0.020 in cv. Superior under the conventional program of fungicide sprays, 10 times sprays during cropping season. Equation of progressive rate, $b_1=0.0088 \text{ ACSV}-0.033$ ($R^2=0.976$), was written by examining the relationship between the parameters of progressive rate of late blight and the average CSV (ACSV) quantifying weather information. By estimating parameters of logistic function, model able to describe the late blight progress of potato, cv. Superior was formulated in $Y=4/(1+39.0 \cdot \exp((0.0088 \text{ ACSV}-0.033) \cdot \text{CSV}))$.

Key words : potato, late blight, meteorology, disease progress, modeling.

강원고랭지에서는 감자역병 방제를 위하여 관행적으로 1작기에 10회 정도 약제를 살포하여 왔는데, 현재 병초발생 이전에는 예찰시스템의 실용화에 의하여 3~4회 정도의 약제살포 횟수의 감소가 가능하게 되었으나(1,3) 발병후에는 여전히 관행방제에 의하여 7~10일 간격으로 약제를 살포하고 있다. 경제적으로 손실이 적은 범위내에서 약제살포를 최소한으로 줄이는 종합적인 병해충 관리시스템의 작성을 위해서는 해당지역의 환경자원량의 정밀한 분석자료를 토대로 한 병해충의 정확한 조기예찰과 합리적인 방제대책 기술개발로 최적 방제스케줄을 제공할 때에 가능할 것이다(7, 15, 22). 이를 위해서는 기상 등 환경자료의 정보화에 이어 작물생장 및 병해충 각각의 모형 개발 및 이들의 통합시스템 작성이 필요한 실정이다(17, 18).

병의 진전도를 예측할 수 있는 모형식 작성을 위해서는 일반적으로 병의 진전정도에 영향을 미치는 환경조건을 독립변수로 하여 병의 진전도를 설명할 수 있는 적합

한 모형선발에 이어 품종(품종)저항성, 약제방제 수준 등에 따라 변하는 진전속도를 표현할 수 있는 parameter를 추정하게 된다.

감자 역병의 이상적인 진전도 곡선은 작물의 생장곡선과 비슷한 sigmoid 형태를 나타내는데(8) 이를 수리적으로 표현하기 위하여 logistic 함수와 Gompertz 모형이 많이 이용된다(21). Tooley 등(20)은 역병 진전도에 기존의 정형화된 여러 모형을 fitting 시켜본 결과 logistic 함수에서 가장 높은 상관을 나타냈다고 보고하였던 반면 Berger(4)는 여러 곰팡이병의 경우 logistic 함수보다는 Gompertz 모형이 병 예측모형으로 적합한 것으로 보고하였다.

병 예측모형 작성시 적정모형 선별과 함께 병 진전속도를 설명할 수 있는 독립변수 선별이 우선적으로 이루어져야 한다. 병 진전도 예측모형 작성시 대부분 기상요소를 가공한 수치를 독립변수로 이용하는 경우가 많은데, Kim과 Park(10)은 고추 탄저병의 진전정도를 예측할 수 있는 모형식 작성을 위하여 매일의 일일 평균상대습도 중 80%를 초과하는 부분의 누적수치 CRH를 독립변수로 하

*Corresponding author.

여 logit 발병율을 계산한 바 있다. MacKenzie(14)는 감자 역병 예측을 위하여 온도, 습도 등 기상자료를 가공한 'BLITECAST' system의 severity value(SV)(13)를 이용하여 적산 SV(CSV)와 logistic 모형의 직선화 변환함수 $\ln(X/(1-X))$ (X:감염정도)와의 기울기로 병 초발생일을 계산하였다.

이와 같이 환경-작물 모형작성시 어떤 작물 혹은 병해충을 대상으로 모형을 작성할 것인가, 또한 어떤 독립변수를 이용할 것인가에 따라서 적합한 모형이 달라지게 된다(6). 본 연구는 감자 역병의 진전도를 설명할 수 있는 독립변수로서 SV의 이용가능성을 검토하고 또한 적합한 모형식 선발에 이어 품종과 약제 살포수준 등에 따라서 달라지는 몇몇 parameter를 추정하여 감자 역병의 진전도를 예측할 수 있는 모형식을 작성하는 데에 목적이 있다.

재료 및 방법

이론식. 감자 역병의 진전도를 예측할 수 있는 모형식 작성을 위하여 병 진전정도를 잘 표현하는 것으로 알려진(4, 20) logistic 모형과 Gompertz 모형을 비교하여 적합한 모형을 선발하였다. 두 모형에서 공통적으로 고려되었던 전제조건은 역병 전염원은 감자포장에 항상 분포되어 있고, 역병 진전은 기상환경 조건에 의하여 달라진다는 것이다. 다른 점은 logistic 모형에서 병 진전은 기질의 소모에 의하여 이루어지는 반면 Gompertz 모형에서 기질은 항상 충분히 존재한다는 전제조건하에서 처음부터 고려대상에서 제외된다(6, 19). Logistic 모형에서 시간 t에 따라서 변화하는 병 진전정도 X는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$dX/dt = k \cdot S \cdot X \dots\dots\dots(1)$$

여기서 k는 parameter이고 S는 기질이다. 병원균에 의하여 소모된 기질 S가 전부 병 진전에 이용된다면, 즉 $dX = -dS$ 라면

$$dX/X = k \cdot (X_f - X) \cdot dt \dots\dots\dots(2)$$

단, X_f 는 X의 최고치. (2)식은 병 진전정도를 나타내는 일반적인 미분방정식으로 보고되어 있다(8). (2)식을 적분하여 변환시키면 다음과 같이 된다.

$$\ln(X/X_f) = k(X_f - X)t \dots\dots\dots(3)$$

X는 X의 초기치이며, (3)식은 병 진전속도를 나타내는 parameter k에 의하여 시간 t에 따라서 변화하는 sigmoid 형태의 곡선을 그리는 다음 식으로 변환될 수 있다.

$$X = X_i \cdot e^{kx} \dots\dots\dots(4)$$

(4)식에 자연대수를 취하면 다음과 같다.

$$\ln(X/(X_f - X)) = k \cdot t \cdot X_f + \ln(X_f/(X_f - X_i)) \dots\dots\dots(5)$$

또한 (4)식을 logistic 함수의 일반적인 형태로 표현하면 다음 식으로 변환될 수 있다.

$$X = X_f / (1 + \exp(-(b_0 + b_1 \cdot t))) \dots\dots\dots(6)$$

여기서 b_0 는 절편, b_1 은 기울기를 나타내는 parameter. (6)식은 다음 식으로 변환될 수 있다.

$$(X_f - X)/X = \exp(-(b_0 + b_1 \cdot t)) \dots\dots\dots(7)$$

(7)식을 직선화하기 위하여 자연대수를 취하여 logit 변환함수 $\ln(X/X_f - X)$ 로 바꾸면 다음과 같이 된다.

$$\ln(X/(X_f - X)) = b_0 + b_1 \cdot t \dots\dots\dots(8)$$

Gompertz 모형은 전제조건에 의하여 (1)식에서 기질을 제외시키는데, t에 따라 변화하는 병 진전정도 X는 다음과 같다.

$$dX/dt = \mu \cdot X \dots\dots\dots(9)$$

μ 는 parameter. (9)식은 감소(decay)parameter 개념의 도입과 함께 여러 변환과정을 거치면 다음과 같은 일반적인 Gompertz 모형으로 변형될 수 있다.

$$X = \exp(-b_0(\exp(b_1 \cdot t))) \dots\dots\dots(10)$$

b_0 와 b_1 는 parameter. (10)식은 Gompit 변환함수 $-\ln(-\ln(X))$ 에 의하여 다음과 같은 1차함수로 변환된다.

$$-\ln(-\ln(X)) = -\ln(b_0) + b_1 \cdot t \dots\dots\dots(11)$$

적정 모형선발 및 parameter 추정. 1975년부터 1992년까지 고령지농업시험장(대관령, 해발 800 m)에서 수행하여 온 18년간의 역병 초발생 및 진전도 조사자료(12)를 logistic 모형과 Gompertz 모형의 변환함수(8, 11식)에 의하여 변환시킨 값과 CSV와의 관계를 조사하여 병 진전도의 설명변수로서 CSV의 이용가능성을 타진하고 아울러 적당한 모형을 비교 선발하였다. 병 진전속도 parameter를 추정하기 위해서는 환경조건에 의하여 변화하는 병 진전도의 기울기를 구하면 되는데(3, 19), 본 연구에서는 CSV를 독립변수로 하고 품종 및 약제방제 수준별로 다르게 나타나는 병 진전도를 종속변수로 회기분석을 실시하였다.

재배방법에 따라서 다르게 나타나는 병 진전도를 조사하기 위하여 품종과 파종기, 약제살포 간격 등을 달리하여 실험을 실시하였다. 1993년과 1997년 남작과 수미, 조풍 등 3품종을 공시하여 대관령 고랭지에서 시험을 실시하였다. 공시처리는 1993년도에는 무방제, 관행방제구를 두어 4월 25일, 5월 5일 및 5월 20일 파종하였고,

1997년은 약제처리 간격을 1주간격, 2주간격, 무방제 및 관행방제 등으로 달리하여 시험을 수행하였다. 관행방제에서는 일반 농가의 감자포장에서 관행적으로 실시되고 있는 방법을 기준으로 5~10일 정도의 간격으로 일정 강우후에 약제를 살포하였다. 방제구는 감자 지상부 출현후부터 병 발생전에는 보호살균제 다이센 M45와 타코닐을, 병 발생후에는 치료살균제 산도판골드와 포롭-D를 교대로 살포하였다. 시험구는 가로 4 m, 세로 5 m로 하고 재식거리는 휴간 75 cm, 주간 25 cm로 하였고, 시비량은 N-P₂O₅-K₂O=15-18-12 kg/10a을 전량기비로 하였으며 퇴비는 1.5 ton/10a 사용하였다. 시험구배치는 품종별 난피법 3반복으로 하였다. 병 진전도는 병발생 정도에 따라서 0(무발생)에서 4(완전감염, 고사)까지 등급화, 지수화한 역병조사기준(9)에 의거하여 2-3일 간격으로 달관조사하였는데, 초기치는 0.1로 하였다. 통계처리는 SAS program package를 이용하였다. 기상자료는 대관령기상관측소의 자료를 이용하였다.

결과 및 고찰

병 진전도. 1975년부터 1992년까지 18년간의 대관령 고랭지 감자포장에서 발생한 역병 발생정도(12)를 Fig. 1에 나타내었다. 감자 지상부 출현후부터 일수에 따라 변화하는 병 진전정도인데, 출현후 20~50일 정도에서 병이 발생하여 연차간에 넓은 분포와 함께 심한 변이를 나타내면서 급격히 증가되는 형태를 보이고 있다.

CSV의 적합성 검정. 병 진전도 모형 작성시 연차간의 변이를 최소한으로 줄이면서 병 진전도를 수리적으로 잘 설명할 수 있는 적절한 설명변수 선발이 중요한 문제이다. 환경-병 진전도 모형작성시 연차간의 변이를 줄이기 위하여 누적일수 대신에 병 진전에 영향을 미치는 환경요소를 가공한 수치를 설명변수로 이용하는 경우가 많

다. 감자 역병의 경우 상대습도와 온도를 가공한 수치인 SV를 이용하여 병 발생 예측모형을 작성한 연구보고가 많은데(13, 16), 본 연구에서도 병 진전도 예측을 위한 설명변수로서 누적 SV의 적합성 여부를 검토하였다. Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 출현후부터의 누적일수 대신에 CSV를 설명변수로 이용하였을 때 Fig. 1에서 보이는 연차간의 변이를 어느 정도 좁히면서 초기 완만한 증가를 보이다가 CSV 40 정도 이후부터 급격히 증가하는 sigmoid 형태를 나타내고 있다(Fig. 2).

변수의 적합성 검정, 적정모형 선발과 parameter 추정 등을 위한 통계처리를 위해서는 병 진전곡선의 직선화가 필수적이다(4, 21). 즉 sigmoid 형태를 나타내는 병 진전도를 변환함수에 의하여 1차함수로 변환시켜 상관계수를 비교하여 적합성을 검정하고 또한 함수의 기울기 등을 구하여 병 진전속도 parameter를 추정하게 된다.

우리 나라의 대표적인 감자 품종인 수미 품종을 대상으로 Fig. 1의 역병 진전도를 logit 변환함수 $\ln(X/X_0 - X)$ (8식)와 Gompit 변환함수 $-\ln(-\ln(X))$ (11식)를 이용하여 변환시켜서 CSV와의 관계를 조사하여 보았다. Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 두 변환함수 모두에서 고도의 상관을 보여 역병 진전도 예측을 위해서 CSV를 독립변수로 이용하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다. Bruhn과 Fry(5)도 SV를 이용하여 병 진전도를 예측하는 simulation model을 작성하여 약제방제 효과를 조사한 바 있다.

적정 모형 선발. 병 진전도를 예측할 수 있는 모형 작성을 위해서는 적절한 독립변수의 결정과 함께 적정모형 선발이 이루어져야 한다. 본 연구에서 취급된 logistic 함수와 Gompertz 모형을 비교하여 보면 두 모형 모두 parameter의 수가 같고 병 진전속도에 의하여 병 진전도가 좌우된다. 그러나 logistic 모형에서 병 진전은 기질의 소모에 의하여 이루어 지며 반응변수의 상하한치 두 범주

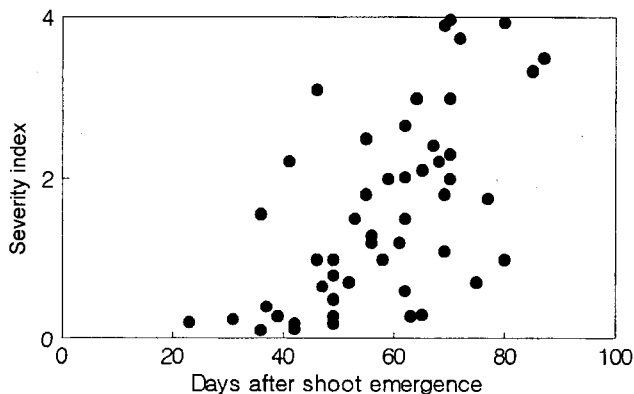


Fig. 1. Relation between severity index of potato late blight and days after shoot emergence during growing period in Taegwallyeong area, 1975 to 1992.

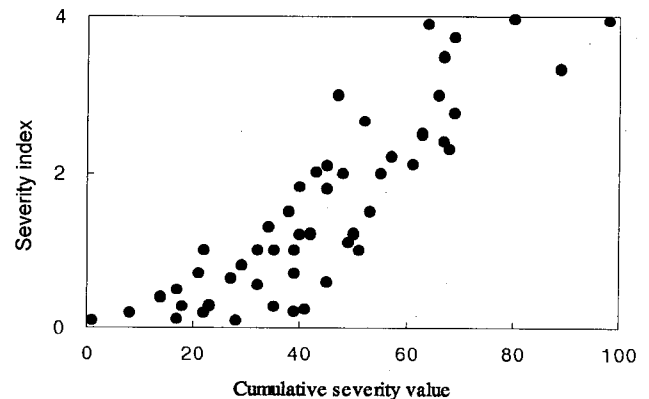


Fig. 2. Relation between severity index of potato late blight and cumulative severity value (CSV) during growing period in Taegwallyeong area, 1975 to 1992.

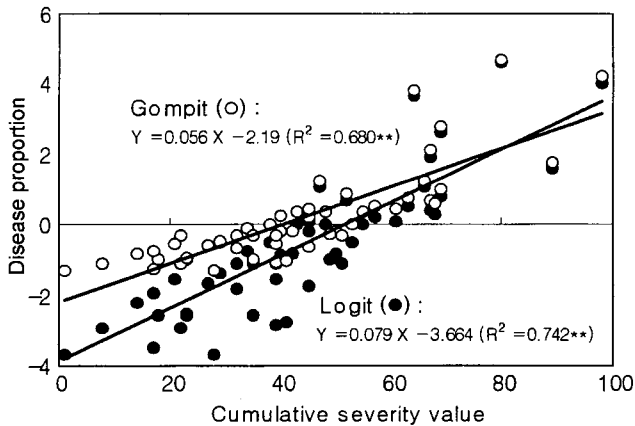


Fig. 3. Comparison of the coefficients of determination between severity index of potato late blight transformed by the logistic (logit) and Gompertz model (Gompit) and cumulative severity value (CSV) during growing period in Taegwallyeong area, 1975 to 1992.

가 사전에 정하여 지는 반면에, Gompertz 모형에서는 기질은 항상 충분히 존재한다는 가설하에서 처음부터 고려 대상에서 제외되며 또한 반응변수의 범주가 없는 대신에 감소(decay) parameter가 이용되므로 곡선의 진전패턴이 다소 다르게 나타난다(6, 19). 즉 logistic 함수에 비하여 Gompertz 모형에서는 초기 성장속도가 빨라 도함수의 꼭지점인 성장 최고속도의 분기점이 일찍 오므로 작성대상으로 하는 병의 종류에 따라서 적합한 모형이 달라지게 된다(4, 6). 감자 역병은 병의 특성상 초발생후 호적한 환경에 조우되면 급진전하는 경향을 나타내는데, 본 연구에서도 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 병의 초기진전, 즉 CSV 50 이전에는 logistic 함수에 비하여 Gompertz 모형에서 분산이 적어 병 진전도를 비교적 잘 따르는 것으로 보이나 후기에 분산이 커지는 것으로 나타났다(Fig. 3). 통계적 결정계수는 logit 변환함수에서 0.742로 Gompit 변환함수 0.680 보다 높게 나타나 logistic 함수가 감자 역병 예측모형으로 적합한 것으로 판정되었다. 이러한 결과는 감자 역병 진전정도는 logistic 함수에서 가장 높은 상관관계를 나타냈다고 보고한 Tooley 등(20)의 연구내용과 일치하였다. Fig.3의 logit 변환함수의 회귀식에 나타난 기울

기와 절편을 (6)식에 대입하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\text{병 발생량 } X = 4 / (1 + 39.0 \cdot \exp(-0.079 \cdot \text{CSV})) \cdot \dots (12)$$

Parameter 추정

- 기상 : 1993과 1997년도 대관령지역의 온도, 습도 등 감자 역병에 중대한 영향을 미치는 요소로 알려진 기상상태를 정리한 결과가 Table 1에 나타나 있다. 역병발생과 밀접한 관련이 있는 상대습도 80% 이상인 조건(2)은 1993년은 6월 상순부터 8월 하순까지 적합하였던 반면 1997년은 1993년 보다 적합한 조건이 다소 늦은 6월 하순 이후부터 나타났다.

- 역병 진전정도 : 1993년 대관령 고랭지에서 품종과 파종기를 다르게 하고, 무방제와 관행방제구를 두어 역병 진전도를 조사하였다(Table 2). 무방제시 첫 파종기의 경우 6월 27일 병이 초발생하여 남작과 수미 모두 20~24일후 역병감염에 의하여 지상부가 거의 고사하였다. 조풍품종은 7월 6일 초발생, 20일후에 SV 3.3 정도의 진전도를 보였고, 품종별로는 조풍에 비하여 수미와 남작품종의 병 진전이 빠른 것으로 나타났다. 파종기가 늦을 경우 병 초발생 및 진전정도도 모든 품종에서 다소 늦어지는 경향이였다. 역병방제시에는 무방제에 비하여 모든 품종에서 역병진전도가 현저히 떨어졌는데, 타 품종에 비하여 조풍에서 저항성효과가 크게 나타났다. 남작과 수미는 병 진전속도 및 방제효과 등에서 품종간에 큰 차이를 발견할 수 없었다.

1997년에는 품종과 약제 살포간격을 달리하여 병 진전도를 조사하여 보았다(Table 3). 수미와 남작은 역병의 초발생 및 진전정도가 비슷하였는데, 평년에 비하여 다소 늦은 7월 중하순경에 초발생하여 생육후기에 거의 고사하였다. 약제 방제수준별로 역병 진전도에 차이를 보여 무방제 및 2주간격 약제살포시 진전이 심하였고 약제 방제 횟수가 많을수록 발병정도가 약하여 관행방제시에 가장 낮은 발병정도를 나타냈다. 조풍은 무방제시 7월 하순경에 병이 미미하게 발생하였고 방제구에서는 병이 전혀 발생하지 않았다.

- Parameter 추정 : 작물병 예측을 위한 모형식 작성

Table 1. Changes in weather conditions in Taegwallyeong area during potato cropping season, 1993 and 1997

Year	Weather element	May				June			July			August	
		E ²	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L
1993	Temp ³	9.2	12.2	13.5	13.4	16.9	15.9	16.4	15.1	14.9	14.8	17.3	16.2
	RH ⁴	75.0	64.1	67.5	82.4	85.8	85.6	83.8	94.0	90.2	92.9	83.0	82.8
1997	Temp	12.0	11.5	9.4	13.4	17.3	18.8	18.2	18.9	21.2	20.6	17.2	19.9
	RH	62.6	73.1	82.1	76.9	72.0	81.3	85.7	84.4	85.3	87.1	92.4	79.7

²: E; Early, M; Middle, L; Late.

³: Mean air temperature (°C).

⁴: Relative humidity (%).

Table 2. Progress of potato late blight on three cultivars planted on different dates with and without fungicide sprays at Taegwallyeong, 1993

Cultivar	Planting date	Fungicide	Date of initial appearance	Disease severity index				
				Jul. 2	Jul. 9	Jul. 14	Jul. 21	Jul. 26
Irish Cobbler	Apr. 26	Unsprayed	Jun. 27	0.2	0.9	2.6	3.9	4.0
		Sprayed ^z	Jun. 27	0.0	0.1	0.3	0.8	1.9
	May 7	Unsprayed	Jul. 4	0.0	0.5	2.9	3.8	4.0
		Sprayed	Jul. 4	0.0	0.03	0.1	0.2	1.2
Superior	May 20	Unsprayed	Jul. 5	0.0	0.8	2.0	3.6	4.0
		Sprayed	Jul. 5	0.0	0.1	0.1	0.6	1.9
	Apr. 26	Unsprayed	Jun. 27	0.03	0.4	2.9	3.9	4.0
		Sprayed	Jun. 27	0.0	0.1	0.1	0.8	2.5
Jopung	May 7	Unsprayed	Jul. 4	0.0	0.4	2.8	3.9	4.0
		Sprayed	Jul. 4	0.0	0.1	0.1	0.4	2.0
	May 20	Unsprayed	Jul. 6	0.0	0.3	2.0	3.7	4.0
		Sprayed	Jul. 6	0.0	0.1	0.1	0.4	2.5
Jopung	Apr. 26	Unsprayed	Jun. 6	0.0	0.1	0.2	1.2	3.3
		Sprayed	Jun. 6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4
	May 7	Unsprayed	Jul. 12	0.0	0.0	0.2	2.0	3.0
		Sprayed	Jul. 12	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3
May 20	Unsprayed	Jul. 12	0.0	0.0	0.2	1.1	2.3	
	Sprayed	Jul. 12	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	

^z: Sprayed in June 14, June 20, June 26, July 1, July 9, July 15, July 20, July 26.

Table 3. Progress of potato late blight on three cultivars planted on different fungicide sprays at Taegwallyeong, 1997

Cultivar	Fungicide spray interval	Date of initial appearance	Disease severity index						
			Jul. 19	Jul. 22	Jul. 24	Jul. 27	Jul. 31	Aug. 5	Aug. 10
Irish Cobbler	SAP ^z	Jul. 30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5
	1-week	Jul. 17	0.1	0.1	0.5	0.7	0.9	1.0	1.2
	2-weeks	Jul. 16	0.7	0.9	1.5	1.7	2.5	2.7	3.0
	Unsprayed	Jul. 15	1.5	1.8	2.4	2.9	3.2	3.5	3.9
Superior	SAP	Jul. 30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.7
	1-week	Jul. 17	0.1	0.1	0.5	0.8	0.8	1.1	1.1
	2-weeks	Jul. 16	0.7	1.0	1.5	1.7	2.5	2.8	3.0
	Unsprayed	Jul. 15	1.5	1.8	2.2	3.0	3.2	3.4	3.9
Jopung	SAP	-	-	-	-	-	-	-	-
	1-week	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-weeks	-	-	-	-	-	-	-	-
	Unsprayed	Jul. 27	-	-	-	0.2	0.5	0.8	0.9

^z: Sprayed after precipitation (Sprayed in June 12, June 21, June 27, July 2, July 7, July 14, July 19, July 24, Aug. 5 and Aug. 14).

을 위해서는 독립변수로 선정된 기상환경 조건이외에 병 진전도에 영향을 미치는 기주(품종)저항성, 약제방제 수준, 재배방법 등을 설명할 수 있는 적절한 parameter를 추정한다든가 혹은 sub-model을 작성하여 기본 모형식에 연계, 통합하여야 한다. 병 진전도 예측모형식에서 중요한 요인으로 작용하는 병 진전속도는 환경조건에 따라 변하는 병 진전도의 기울기로써 구하게 된다(19, 22). Logistic 함수(6식)의 병 진전속도 parameter b_1 을 추정하기 위하여 Table 2의 병 진전도를 $\ln(X/X_0 - X)$ (8식)로 변환시킨 logit 발병율과의 CSV와의 관계를 조사하여 보았다.

우선 시험이 수행된 1993년과 1997년도 감자 생육기간 중의 CSV를 경시적으로 조사하여 보았던 바, 2개년 모두 생육초기에는 완만한 증가를 보인 이후 1993년은 감자 출아후 40일정도 이후부터 급격히 증가되었고 1997년은 생육후기에 급격히 증가하는 특징을 보이고 있다(Fig. 4).

1993년도 감자 재배기간 중의 CSV를 독립변수로 하여 무방제시의 병 진전속도를 조사한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 병 진전속도를 나타내는 곡선의 기울기는 남작과 수미는 각각 0.137, 0.136로 거의 비슷하였는데 조풍은 0.070으로 타 품종에 비하여 기울기가 완만한 것으

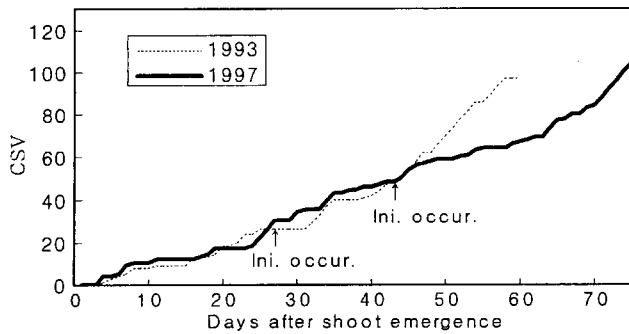


Fig. 4. Changes in cumulative severity value (CSV) during potato growing period in Taegwallyeong area in 1993 and 1997.

로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 보아 조풍은 병 진전 속도가 타 품종에 비하여 상당히 늦은 것으로 확인되었고, 수미와 남작은 역병 초발생(1)뿐만 아니라 병 진전 속도도 거의 비슷한 것으로 나타나 병 방제스케줄 작성시 함께 취급하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다. 이와 같이 감자는 품종에 따라서 역병저항성이 다르고 이러한 품종저항성의 차이는 역병 방제스케줄 작성시 중요한 요인으로 작용하는 것으로 보고되었다(14).

1993년과 1997년의 자료를 취합하여 방제수준이 다를 때 병 진전속도의 변화를 알아보았다(Table 4). 방제간격이 좁거나 횟수가 많을수록 수미는 병 진전속도가 늦어졌고 조풍은 약제방제시 병이 발생하지 않거나 병 진전속도가 아주 늦어지는 경향이였다. 그러나 기상조건에 의하여 병이 처음 발생하고 그후 진전이 이루어지는 감자역병의 진전속도를 약제방제 횟수나 간격을 기준으로 설명하는 것은 무리가 있을 것으로 생각되었다. Krause 등(13)은 SV를 이용하여 감자 역병 초발생 예측에 이어 발병후 계획방제가 가능한 시스템을 작성한 바 있는데,

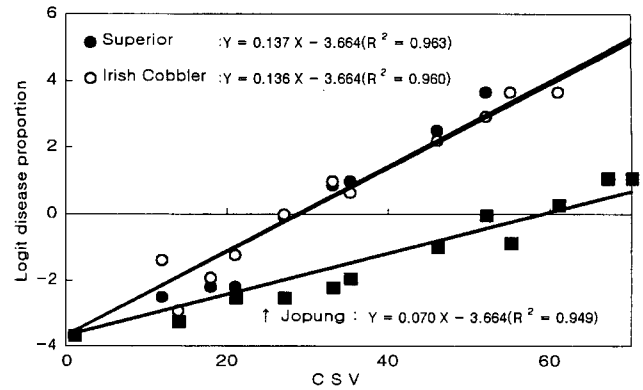


Fig. 5. Comparison of the coefficients of determination between severity index of potato late blight transformed by the logistic (logit) and cumulative severity value (CSV) on three cultivars during growing period without fungicide spray in Taegwallyeong area, 1993.

본 연구에서도 약제 살포간격을 나타낼 때 흔히 사용되는 일수대신에 그 기간동안의 기상상태를 수치화한 CSV를 기준으로 하여 병 진전속도를 조사하였다. 즉 재배기간 동안의 CSV를 총 약제살포 횟수로 나눈 수치인 평균 CSV(ACSV)를 이용하여 병 진전속도와의 관계를 조사하였다. 감자 1작기 중 약제 살포횟수는 살포간격에 따라서 5~10회였는데 이를 ACSV로 환산하면 6.7-13.4로 계산되었다. 병 진전속도는 살포횟수가 많을수록, 즉 ACSV가 적을수록 늦어져서 10회 살포시 수미에서 0.020이었다. Table 4의 병 진전속도(b_1)와 ACSV와의 관계를 조사하여 기상조건에 의하여 병 진전속도를 예측할 수 있는 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$b_1 = 0.0088 \text{ ACSV} - 0.033 (R^2 = 0.976) \dots \dots \dots (13)$$

Logistic 함수의 이론모형식 (6)의 절편 parameter b_0

Table 4. Average cumulative severity value (ACSV) and the progressive rate of potato late blight in different pesticidal level and cultivars, 1993 and 1997

Cultivar	Fungicide spray interval	No of Application times	ACSV ^z	Progressive rate	Coefficients of determination (R ²)
Superior	Unsprayed	0	-	0.137	0.963
	14-days	5	13.4	0.083	0.860
	SAP1 ^y	8	8.8	0.049	0.907
	7-days	9	7.4	0.034	0.774
	SAP2 ^x	10	6.7	0.020	0.998
Jopung	Unsprayed	0	-	0.070	0.949
	14-days	5	13.4	-	-
	SAP1 ^y	8	8.8	0.023	0.810
	7-days	9	7.4	-	-
	SAP2 ^x	10	6.7	-	-

^z: Average CSV per application interval (total/number of application times).

^y: Sprayed in June 14, June 20, June 26, July 1, July 9, July 15, July 20 and July 26, 1993.

^x: Sprayed in June 12, June 21, June 27, July 2, July 7, July 14, July 19, July 24, Aug. 5 and Aug. 14, 1997.

는 (5)식의 $\ln(X_i/(X_i - X_0))$ 로 구할 수 있는데, 모형의 반응변수의 두 범주 즉, X 의 최고치 X_1 가 '4', X 의 초기치 X_0 가 '0.1'로 정해져 있으므로 b_0 는 -3.664로 계산되었다. 구하여진 절편상수와 병 진전속도를 나타내는 (13)식을 (12)식에 대입하여 감자 수미품종의 역병 진전도를 예측할 수 있는 모형식을 작성하였다.

$$\text{병 진전도 } X = 4 / (1 + 39.0 \cdot \exp(-0.0088 \text{ ACSV} - 0.033) \cdot \text{CSV}) \dots \dots \dots (14)$$

조풍은 수미의 절반정도의 진전속도를 보여 무방제시에도 수미의 관행방제와 비슷한 진전도를 나타냈는데 본 연구에서는 Table 4에 있는 바와 같이 조풍은 자료가 적어서 진전도 예측모형식 작성이 불가능하였다. 그러나 조풍은 역병저항성품종(11)으로 알려져 있는데 본 연구에서도 진전속도가 낮은 것으로 나타나 저항성품종으로 다시 확인되었고 실제 재배시 역병은 크게 문제가 되지 않은 품종으로 간주되고 있다.

이상의 연구결과로 감자 역병 진전도를 예측할 수 있는 모형식이 작성되어 합리적인 계획방제 스케줄 작성이 가능할 것으로 생각된다. 즉 예측시스템에 의한 초발생예찰(1, 3)에 이어, 초발생시에는 작물의 생육단계, 경제적인 피해허용 범위 등을 고려하여 사전에 계획된 병방제수준에 따라서 ACSV가 결정되고 자동기상관측장치에 의하여 측정되는 실시간 기상자료를 분석하여 CSV를 계산, 적절한 방제시기를 결정하면 될 것으로 생각된다. 금후 ACSV에 대한 추가검토와 함께 작물의 생장모형이 선발되고 경제적인 피해허용 범위 등을 결정할 수 있는 각종 모형을 개발, 통합하여 농업생태계를 고려하면서 약제살포를 최소한으로 줄일 수 있는 종합적인 방제스케줄 작성연구가 수행되어야 할 것으로 생각되었다.

요 약

감자 역병 진전도를 예측할 수 있는 모형작성을 위하여 1975년부터 1992년까지 18년간 대관령 고랭지 감자포장에서 발생한 역병 발생정도를 logit 변환함수와 Gompit 변환함수를 이용하여 변환시킨 자료와 기상자료를 가공한 CSV와의 관계를 조사하여 독립변수의 적합성을 검정하고, logistic 모형과 Gompertz 모형을 비교하여 적정모형을 선발하였다. 두 변환함수 모두에서 고도의 상관을 보여 역병 진전도예측을 위한 독립변수로 CSV가 적합한 것으로 나타났는데 통계적 결정계수는 Gompit 변환함수 0.680보다 logit 변환함수에서 0.742로 높게 나타나 logistic 함수가 감자 역병 예측모형으로 적합한 것으로 판정되었다. 감자 역병 진전도예측을 위한 적절한 모형으로 선정된 logistic 함수의 parameter는 절편과 병 진전

속도를 나타내는 두 개로 구성되는데 절편 parameter는 -3.664로 계산되었다. 무방제시의 병 진전속도는 수미와 남작에서 각각 0.137와 0.136으로 거의 비슷하였고 조풍은 0.070이었다. 진전속도는 약제 살포횟수가 많을수록 늦어져서 수미품종에서 10회 약제살포시 0.020이었다. 약제방제 수준별 병 진전속도와 기상조건을 정량화한 수치 ACSV 사이에서 다음과 같은 관계식을 얻어 이를 병 진전속도 parameter(b_1)로 이용하였다. $b_1 = 0.0088 \text{ ACSV} - 0.033 (R^2 = 0.976)$. 추정된 절편 및 병 진전속도 parameter를 logistic 모형에 대입하여 다음과 같은 수미품종의 역병 진전도 모형식을 작성하였다. 병 진전도 $X = 4 / (1 + 39.0 \cdot \exp((0.0088 \text{ ACSV} - 0.033) \cdot \text{CSV}))$.

참고문헌

1. 안재훈, 함영일, 박천수, 김병현, 김정간. 1994. 기상정보에 의한 감자 역병 예찰시스템 작성. 농업논문집 36(1): 320-325.
2. 안재훈, 이정명, 윤진일, 함영일, 김병현, 엄영현, 김정간. 1996. 기상 정보에 의한 감자 생장 및 수량예측 모형작성. I. 이론식 작성 및 parameter 추정. 농업논문집 38(2): 331-344.
3. 안재훈, 함영일, 박은우. 1998. 감자 역병 초발생일 예찰을 위한 '이동평균법' 개발. 한국식물병리학회지. 14(1): 34-40.
4. Berger, R. D. 1981. Comparison of Gompertz and logistic equations to describe plant disease progress. *Phytopathology* 71: 716-719.
5. Bruhn, J. A. and Fry, W. E. 1981. Analysis of potato late blight epidemiology by simulation modeling. *Phytopathology* 71: 612-616.
6. France, J. and Thornley, J. H. M. 1984. Mathematical model in agriculture. Butterworth, London, 80-81.
7. Friesbie, R. E. and Adkisson, P. L. 1985. IPM: Definitions and current status in U. S. agriculture. In *Biological control in agricultural IPM System*. pp.41-51.
8. 황병국. 1985. 식물의학. 535pp. 탐구당.
9. James, C. W. 1971. A manual of assessment for plant disease. Canada Department of Agriculture Publication No. 1458.
10. Kim, C. H. and Park, K. S. 1988. A predictive model of disease progression of red-pepper anthracnose. *Korean J. Plant Pathol* 4: 325-331.
11. 김관수, 김현준, 김화영, 김정간, 함영일, 한병희. 1990. 감자 조기 내병다수성 신품종 "부풍" 육성. 농사시험연구 논문집(원예) 32(2): 50-54.
12. 고령지시험장. 1975-1992. 중서단계별 병해검정 및 주요작물 병해충조사. 시험연구보고서.
13. Krause, R. A., Massie, L. B. and Hyre, R. A. 1975. BLITECAST: A computerized forecast of potato late blight. *Plant Dis. Rept.* 59(2): 95-98.
14. MacKenzie, D. R. 1981. Scheduling fungicide applications for potato late blight with BLITECAST. *Plant Dis.* 65: 394-399.

15. Shields, E. J., Hygnstorm, J. R., Curwen, D., Stevenson, W. R., Wyman, J. A. and Binning, L. K. 1989. Pest management for potatoes in Wisconsin-a pilot program. *Am. Potato J.* 66:227-233.
16. Shtienberg, D., and Fry, W. E. 1990. Quantitative analysis of host resistance, fungicide and weather effects on potato early and late blight using computer simulation models. *Am. Potato J.* 67:277-286.
17. Stevenson, W. R. 1983. An integrated program for managing potato late blight. *Plant Dis.* 67:1047-1048.
18. Stevenson, W. R. 1993. IPM for potatoes: A multifaceted approach to disease management and information delivery. *Plant Dis.* 77:309-311.
19. Thornley, J. H. M. 1976. Mathematical models in plant physiology. Academic Press, London. pp.8-11.
20. Tooley, P. W., Sweigard, J. A. and Fry, W. E. 1986. Fitness and virulence of *Phytophthora infestans* isolates sexual and asexual populations. *Phytopathology* 76:1209-1212.
21. Vanderplank, J. E. 1963. Plant disease : Epidemics and control. Academic Press, N.Y. 349pp.
22. Zadoks, J. C. 1981. EPIPPE: a disease and pest management system for winter wheat developed in the Netherlands, EPPO Bull. 11:365-36.

(Received May 27, 1998)