

클러스터 조사에 의한 마늘 세균점무늬병의 축차표본조사법 개발

Development of Sequential Sampling Plan for Bacterial Leaf Blight of Garlic by Cluster Sampling

송정흙^{1*} · 양철준¹ · 양영택¹ · 심홍식² · 좌창숙¹¹제주특별자치도농업기술원 친환경연구과, ²국립농업과학원 작물보호과Jeong Heub Song^{1*}, Cheol Joon Yang¹, Young Taek Yang¹, Hong Sik Shim² and Chang Sook Jwa¹***Corresponding author**

Tel : +82-64-760-7341

Fax: +82-64-760-7399

E-mail: sjheub@korea.kr

¹Division of Sustainable Agricultural Research, Jeju Agricultural Research and Extension Services, Seogwipo 63556, Korea²Crop Protection Division, Department of Crop Life Safety, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, KoreaReceived August 28, 2015
Revised September 15, 2015
Accepted October 23, 2015

Bacterial leaf blight caused by *Pseudomonas syringae* pv. *porri* is one of the major bacterial diseases of garlic (*Allium sativum*). In South Korea, the disease has only been observed in garlic-growing regions of Jeju island. The spatial distribution pattern of the disease was analyzed by binary power law, in which the natural logarithm of the observed variance is regressed on the natural logarithm of the binomial variance. The estimated slope ($b=1.361$) of the regression was greater than 1 which meant that the diseased plants were aggregated. The sequential sampling plans were developed for estimating the mean incidence rate (p_m) and classifying the mean incidence as being below or above the critical incidence rate (p_c). These results could be used on more efficient and higher precise sampling for bacterial blight of garlic compared to fixed sample sized sampling.

Keywords : Bacterial leaf blight, Binomial power law, Garlic, Sequential sampling plan

서 론

Pseudomonas syringae pv. *porri*에 의한 마늘세균점무늬병 (bacterial leaf blight of garlic)은 *Erwinia rhapontici*에 의한 무름병과 *Pseudomonas marginalis* pv. *marginalis*에 의한 잎집 썩음병 등과 함께 마늘에 발생하는 세균병 중의 하나이며(The Korean Society of Plant Pathology, 2009), 현재까지 제주지역에서 재배되고 있는 난지형 마늘에 발생되고 있다. 세균점무늬병은 마늘잎에 수침상의 반점 형태로 나타나며 병이 진전되면

병반이 서로 합쳐져 띠 모양의 증상이 보이기도 한다. 심한 경우 잎이 고사하기도 한다. 마늘 재배기간 동안 토양 습도가 높고 저온일 때 발병하는데 특히 겨울철 비가 잦은 해에 병 발생이 심하다.

세균점무늬병은 영국, 프랑스, 뉴질랜드, 네덜란드, 이태리, 미국 등에서 리크(*Allium ampeloprasum*)에 발생되고 있으며 (Samson 등, 1998), 국내에서는 Lee 등(2000)이 마늘에서 처음 병 발생을 보고하였고 이후 양파와 쪽파에도 발생되고 있다 (Myung 등, 2011; 2012).

식물병의 발생수준을 추정하고 평가하는 것은 단순히 병의 발생여부보다 병 확산의 예측, 작물 수량 감소 등을 고려해야 한다. 농작물에 발생한 식물병의 이병도와 발병도를 정확히 추

Research in Plant Disease

©The Korean Society of Plant Pathology
pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

정하기 위해 통계학적 접근방법을 이용한 표본조사법이 필요하다. 표본조사는 농작물 병해관리에서 병 확산, 방제 등에 대한 의사를 결정할 때 기본적으로 이루어져야 한다(Campbell 등, 1990).

식물병의 표본조사 방법은 비제한적 임의조사법과 클러스터조사법이 이용되고 있다. 비제한적 임의조사법은 일정면적당 발병주수, 식물체당 병반수 등을 직접 계수하는 방법인 반면에 클러스터조사법은 일정 식물체수에 대해 건전주와 이병주를 계수하는 방법으로 식물병 종류와 발생특성 등에 따라 한 방법을 선택하여 사용하고 있다. 병 발생 상황을 효율적으로 파악하려면 이병식물의 포장 내 분포양상과 평균 이병수와 분산과의 관계를 파악하는 것이 중요하다(Madden과 Hughes, 1999). 병해의 표본조사법에는 클러스터 조사를 통해 얻은 자료로 binary power law(BPL)을 사용하고 있다(Turechek 등, 2011). 비제한적 임의조사법은 잎이나 주당 병반수를 조사하기 때문에 조사시간이 많이 소요되지만 클러스터조사법은 일정 조사주수에 대한 이병주수를 조사하여 조사가 간편한 장점이 있다. 그러나 일정 면적당 발병정도가 중요한 식물병의 경우에는 이를 반영하는데 한계가 있다. 축차표본조사법은 조사하는 표본수가 고정되지 않으며 식물병이 일정 수준에 도달했는지에 대한 발생빈도를 평가하는 한 방법이다.

본 연구는 마늘 세균점무늬병에 대한 정확한 평균 발생밀도를 추정하고 방제여부를 판단하기 위하여 클러스터조사법을 이용해 얻은 자료로 BPL 분석을 통해 마늘 세균점무늬병의 포장 내 분포특성을 구명하였으며, 축차표본조사법을 이용하여 평균 밀도추정을 위한 표본수와 방제의사결정 방법을 정립하였다.

재료 및 방법

자료수집

분석자료는 세균점무늬병이 상습적으로 발생하고 있는 지역인 서귀포시 안덕면지역의 2개 농가재배 마늘포장(좌표: N 33°14'42", E 126°18'44"; N 33°14'42", E 126°18'08", 면적: 2,500 m²와 5,000 m²)에서 조사한 자료를 이용하였다. 자료수집은 2014년 1월부터 3월까지 15일 간격으로 월 2회 실시하였다. 조사방법은 조사시기별로 포장을 4-5개의 구획(크기: 7.2 × 50 m)으로 나눈 후 구획 내에서 임의의 20지점을 조사하였다. 조사지점간에는 최소한 5 m 간격을 두었는데, 병 발생의 조사지점간 상관성을 최소화할 수 있는 거리로 사전 예비조사를 통해 결정하였다. 이병주수는 지점당 임의로 선정한 10주에서 조사하였으며, 조사시기와 포장, 구획별로 평균이병주율 $[p_m = \sum x_j / (nN)]$, x_j 는 이병주수, n 은 지점당 조사주수(본 연구에서는 10주), N 은 구획당 조사지점수(본 연구에서는 20지점)과 관측분산(v_{obs})을 구하였다. 본 연구기간 동안 얻은 총 27개의 자료를 이용하여 분석하였다.

자료 분석

분포특성. 세균점무늬병의 분포특성을 알아보기 위하여 관측분산(v_{obs})과 이항분산(v_{bin})과의 관계를 다음 식을 이용하여 분석하였다.

$$\ln(v_{obs}) = \ln(A) + b \ln(v_{bin}) \quad (1)$$

여기에서 $v_{obs} = \sum (x_j - p_m n)^2 / (N - 1)$, $v_{bin} = p_m(1 - p_m) / n$ 을 의미하며, A 와 b 는 선형회귀식의 절편과 기울기 값으로 포장 내 분포특성을 가리키는 지표로 이용된다. A 와 b 가 모두 1과 같으면 임의분포를, $A > 1$ 이고 $b = 1$ 이면 공간적 이질성이 일정한 균일분포를, A 와 b 가 모두 1보다 크면 평균 이병주율에 따라 공간적인 이질성을 갖고 있어 집중분포를 하고 있음을 의미한다.

고정 조사지점수에서 이병주율 추정. 국내에서 농작물에 발생하는 병해 조사는 일반적으로 조사지점수를 조사의 정확도에 대한 검증이 부족한 상태에서 사전에 조사표본수를 정해 놓고 이루어지고 있다. 일정 정확도 수준(D)을 갖는 p_m 값을 추정하는 방법으로 병해 발생을 클러스터 조사법을 이용하여 조사지점수(N)를 결정하고 있다(Huges 등, 1996; Madden and Hughes, 1999).

$$N = a p_m^{(b-2)} (1 - p_m)^b / D^2 \quad (2)$$

여기에서 a 는 An^{-b} 이며, D 는 평균 이병주율에 대한 표준오차의 비 $[SE(p_m) / p_m]$ 로 계산되는데 그 값이 작을수록 조사의 정확도가 높음을 의미한다.

평균 이병주율 추정을 위한 축차표본조사법. 조사지점수를 고정하여 표본조사를 하는 방법과 달리 조사를 진행하면서 미리 정한 D 수준을 충족하는 p_m 값을 추정할 수 있다면 조사비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 축차표본조사법에서는 조사한 지점수까지 누적한 이병주율을 이용하여 일정 정확도 수준에서의 p_m 값을 추정하는 방법을 제시하고 있다. 누적 이병주수 $T_N = \sum x_j = pnN$, $j = 1, 2, \dots, N$ 번째 조사지점으로 그 조사한 지점까지의 이병주수의 합을 말한다. 세균점무늬병이 BPL에 적합하고 기울기 b 값이 1보다 클 경우 이병주율에 따라 분산이 달라지기 때문에 다음 식으로 구한다.

$$T_N^{b-2} (nN - T_N)^b = (D^2/a)n^{(2b-2)}N^{(2b-1)} \quad (3)$$

와 n, a, b 값이 정해지면 식 (3)의 양변 값이 최대한으로 근접한 값을 구할 수 있는데 이 값을 조사지점수(N)에 따라 조사를 중지하는 T_N 값으로 한다. 즉 조사를 진행하면서 그 지점까지의 이병주수를 누적한 값과 T_N 값을 비교하여 누적 이병주수가 T_N 값 이상일 때 조사를 중지하고 평균을 구하면 미리 정한 정확도 수준의 평균이병주율(p_m)을 얻을 수 있는 것이다.

의사결정을 위한 조사중지선. 축차표본조사법을 이용하면

방제여부에 대한 의사결정을 할 수 있으나 식물 병에 대한 의사결정 방법으로 측차표본조사법을 이용한 예는 많지 않다. 본 연구에서는 클러스터 조사에서 사용 가능한 중지선을 다음 식에 의하여 구하였다.

$$i_0 + snN < T_N < i_1 + snN \quad (4)$$

이 식은 T_N 과 snN 과의 직선 관계식으로 표현된다. 이때의 직선식은 기울기와 s , 절편인 i_0 와 i_1 을 갖는다. Madden과 Hughes (1999)는 방제의사결정에 이 관계를 이용하여 기울기와 절편 값을 구하는 식을 개발하였다.

$$s = p_t \quad (5)$$

$$i_0 = \frac{\ln[\beta/(1-\alpha)An^{1-b}[p_t(1-p_t)]^b]}{p_1 - p_0} \quad (6)$$

$$i_1 = \frac{\ln[(1-\beta)/\alpha]An^{1-b}[p_t(1-p_t)]^b}{p_1 - p_0} \quad (7)$$

여기에서 p_t 는 요방제수준을 의미하는 것으로 $p_t = (p_0 + p_1)/2$ 로 계산되고, p_0 는 방제가 불필요한 이병주율 중 가장 높은 값, p_1 은 방제가 필요한 이병주율 중 가장 적은 값을 나타낸다. 본 연구에서는 p_1 과 p_0 값을 각각 0.2와 0.1을 사용하였다. α 와 β 값은 통계적 유의수준을 결정할 때 나타날 수 있는 통계적 오류범위이다. α 는 실제 이병주율이 방제가 불필요임에도 방제를 해야 하는 것으로 결론을 맺는 오류이고, β 는 그 반대로 방제가 필요함에도 불구하고 방제가 불필요하다고 결론을 내리게 되는 오류이다. 일반적으로 α 와 β 값은 0.1 또는 0.05를 사용하는데 본 연구에서는 방제에 대한 의사결정의 오류를 줄이기 위하여 α 값은 0.1, β 값은 0.05를 이용하였다.

결과 및 고찰

세균점무늬병의 관측분산과 이항분산과의 관계를 분석한 결과 기울기(b) 값이 1.361로 1보다 커 집중분포를 하고 있었으며 ($t=3.768, P<0.001$), 결정계수($r^2=0.89$)도 높아 두 분산 간의 관계를 잘 설명하고 있었다(Fig. 1). 분석에 이용한 27개 자료의 지점당 p_m 의 범위는 0.005 - 0.570이었다. 이항분산값이 커질수록 추세선과 이항직선과의 격차가 벌어지는 경향이었는데 이는 이병주율이 증가할수록 집중도가 더 높아졌기 때문인 것으로 판단된다. p_m 이 낮아지면 이항분산 값이 관측분산 값보다 오히려 더 커지는 양상을 보였다. 이항직선과 추세선이 만나는 지점에서의 이병주율을 계산한 결과 그 지점에서의 평균 이병주율 $p_m=0.004$ 이었는데 이는 이병주율이 이보다 적어지면 임의분포를 하고 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서 마늘 세균점무늬병의 공간분포 특성이 집중분포를 하고 있었는데 이는 딸기 윤반병($b=1.20$, Turechek 등, 2001), 포도 노균병($b=1.296$, Madden

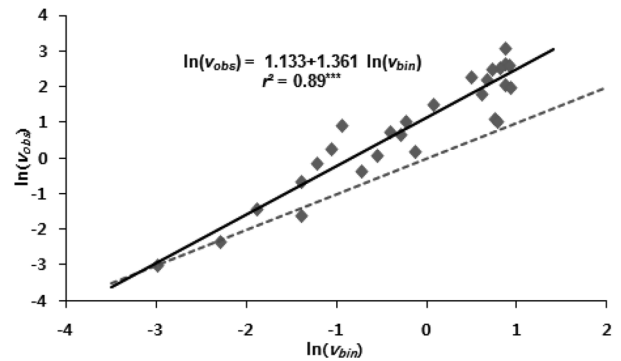


Fig. 1. Relationship between the natural logarithm of the observed variance and of the binomial variance for incidence of bacterial leaf blight of garlic. Each points represents results for a field plot at one sampling time. The solid line represents the trend line, the dash-dot line represents the binomial (random) line.

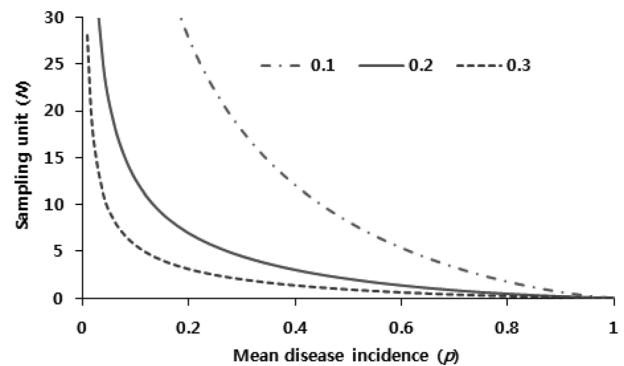


Fig. 2. Sampling curves for incidence of garlic plants required for estimating mean disease incidence (p_m) of bacterial leaf blight of garlic at a fixed-precision level of 0.1, 0.2 and 0.3.

등, 1995)에 대한 분석결과와 유사하였다.

고정 정확도(D) 0.1과 0.2, 0.3 수준에서 p_m 을 추정하는데 필요한 조사지점수를 구한 결과 고정 정확도 수준이 높을수록 필요한 N 은 증가하는 경향이었으며, p_m 값이 증가하면 조사지점수가 기하급수적으로 감소하는 경향이였다(Fig. 2). 일정 정확도 수준을 갖는 측차표본조사에서 요구되는 N 을 추정하는데 필요한 파라미터인 a 값을 앞의 관계식으로부터 구한 결과 0.135이었다. D 가 0.1과 0.2, 0.3 수준일 때 $p_m=0.1$ 을 추정하기 위해 필요한 N 값은 각각 51지점, 13지점, 6지점으로 정확도 수준이 높을수록 필요한 조사지점수가 증가하는 경향이였다. D 가 0.2일 때 $p_m=0.1$ 과 0.15, 0.2일 때 요구되는 조사지점수는 각각 13지점, 9지점, 7지점이였다.

D 가 0.1과 0.2, 0.3 수준일 때 일정 조사지점까지의 이병주수를 누적한 값(T_N)을 이용하여 조사의 중지여부를 판단하고 중지선 이상일 때 조사를 중지하고 p_m 을 추정할 수 있다(Fig. 3). D 가 높거나 이병주수가 적을수록 조사를 중지하려면 더 많은 이병주가 필요했다. D 수준에 관계없이 일정 N 이상을 조사하면

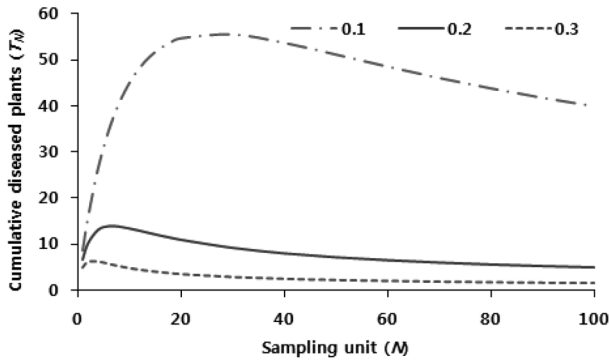


Fig. 3. Sampling stop limits for estimating mean disease incidence (p_m) of bacterial leaf blight of garlic at a fixed-precision level of 0.1, 0.2 and 0.3.

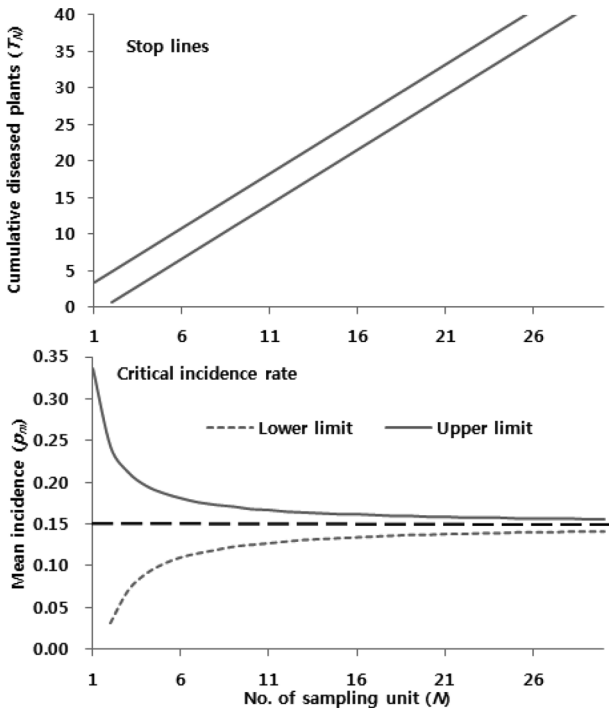


Fig. 4. Sequential sampling stop line and average incidence rate of bacterial leaf blight of garlic from cluster sample ($n=10$ plants per sampling unit). Parameters were $\alpha=0.1$, $\beta=0.05$, $p_0=0.1$ and $p_1=0.2$.

조사를 중지하는데 필요한 T_N 값이 오히려 감소하는 경향이었는데, 감소가 시작되는 N 과 p_m 값은 각각 $D=0.1$ 수준일 때 30과 0.19, $D=0.2$ 일 때 6과 0.23, $D=0.3$ 일 때 4와 0.15이었다. 즉, $D=0.2$ 수준에서 $N=1$ 일 때의 p_m 값은 0.66으로 매우 높았으나 $N=8$ 일 때 p_m 값은 0.17로 급격히 감소하였다. 그러나 N 을 9 이상으로 증가하더라도 p_m 값은 크게 변하지 않았다.

조사지점수(N)와 세균점무늬병 이병누적주수(T_N)와의 관계를 이용하여 요방제수준(p_t) 0.15, α 와 β 오류를 각각 0.1과 0.05일 때의 방제에 대한 의사결정의 상한과 하한 값을 구하였다(Fig. 4). N 개 지점까지의 T_N 값이 하한 값보다 적으면 “방제 불필

요”로, 상한 값보다 많으면 “방제”로 의사를 결정하고 조사를 중지한다. 그러나 T_N 값이 상한과 하한 값 사이에 존재하는 경우에는 계속 조사를 진행하게 된다. “방제 불필요”의사결정은 최소 2개 지점을 조사해야 가능하였으며($p_m=0.05$), “방제”의사결정은 1번째 지점을 조사했을 때에도 판단할 수 있었다($p_m=0.3$). 의사를 결정하는 상한과 하한 값에서의 p_m 값은 $N=4$ 일 때까지는 기하급수적으로 감소하였으나 그 이후부터는 N 이 증가함에 따라 p_t 값인 0.15에 가깝게 수렴하는 경향을 보였다.

병해의 종합관리를 위해서는 병해 발생에 필요한 병원균의 밀도와 발생환경(온도, 습도, 기주식물의 생육단계 등) 등 다양한 정보가 필요하다. 그 중 병원균의 발생밀도는 직접적인 조사에 한계가 있어 주기적인 조사를 통해 병해 발생을 조기에 발견하는 것이 필요하다. 병해의 발생조사는 병해 발생정도(이병주율, 병반면적을 등)의 추정과 방제여부에 대한 의사결정 등을 목적으로 하고 있으며, 병해충 종합관리 프로그램에서 중요한 부분을 차지한다.

축차표본조사법은 최소의 조사노력으로 병해충의 발생정도를 추정할 수 있는 방법 중의 하나이다(Nyrop과 Binns, 1991). 이를 위해서는 우선 병해 발생의 공간적 분포특성에 대한 정보가 중요하기 때문에 본 연구에서도 클러스터 조사자료를 이용하여 마늘 세균점무늬병에 대해 통계적 분석방법을 통해 이를 구명하였다. 그리고 세균점무늬병의 공간분포 특성을 이용하여 Madden 등(1995)과 Madden과 Hughes(1999)가 제시한 수식을 이용하여 평균 이병주율을 추정하는데 필요한 조사지점수와 조사중지선, 의사결정곡선을 개발하였다.

본 연구를 통해 얻은 마늘 세균점무늬병의 표본조사방법은 서귀포시 안덕면 지역의 마늘재배 포장에서 얻은 한정된 자료를 분석한 결과이지만 분석에 사용한 자료수가 27개이고, 평균 병발생주율이 0.005–0.57의 범위에 고르게 분포하고 있어 일반화하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 조사요령은 마늘 밭에서 임의로 조사 이랑을 선택한 후 이랑 입구에서 10 m 이내에서 임의의 지점($n=10$ 주)을 조사한다. 조사지점 간에는 최소한 3 m 정도 떨어져 있도록 한다. 조사지점수는 조사포장의 발병정도에 따라 달라지며, 선택한 지점의 조사를 끝낼 때마다 그 지점까지의 이병주수를 누적하여 미리 정한 D 수준에서의 T_N 값을 넘었는지를 비교한다. 누적 이병주수가 T_N 값 이상이면 조사를 중지하고 p_m 을 $T_N/(nN)$ 식에 의하여 구한다. 이는 방제의사결정에도 동일하게 적용하여 사용하는데, T_N 값이 의사결정곡선의 상한값 이상이거나 하한값 이하일 때에는 조사를 중지하고 각각 “방제”와 “방제불필요”로 의사를 결정하면 된다.

아직까지 국내에서 마늘 세균점무늬병의 발생생태와 요방제수준(p_t)에 대한 연구는 없지만 본 연구에서는 p_t 를 0.15로 가정하여 의사결정곡선을 구하였다. 앞으로 병 발생생태에 기초한 p_t 에 대한 추가적인 연구가 필요하지만 본 연구결과를 활용한다면 현장에서 효율적이고 정확한 발생정도의 추정과 함께 방제여부를 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

요 약

마늘 세균점무늬병은 국내에서 제주지역 난지형 마늘에서 *Pseudomonas syringae* pv. *morri*에 의해 발생하는 세균병해로 주요 병해 중 하나이다. 본 연구는 자연로그를 취한 이항분산에 대한 관측분산의 회귀모델인 binary power law를 이용하여 포장 내 병 발생의 공간분포 특성을 분석하였다. 회귀식의 기울기 (b) 값이 1.361로 기준치인 1보다 커 세균점무늬병은 공간적으로 집중분포하고 있었다. 축차표본조사법은 평균이병주율(p_m)의 추정과 요방제수준(p_c) 이상 또는 이하 여부를 판단할 수 있도록 개발하였다. 본 연구결과는 기존의 조사지점수 고정 조사 방법에 비해 조사비용 면에서 더 효율적인 동시에 조사결과의 정확도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ009192)" Rural Development Administration, Korea.

References

Campbell, C. L. and Maden, L. V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. John Wiley & Sons, New York.
Hughes, G., Madden, L. V. and Munkvold, G. P. 1996. Cluster sam-

pling for disease incidence data. *Phytopathology* 89: 487–494.
Lee, S. D., Kim, Y. K., Shin, Y. S. and Choi, S. H. 2000. Bacterial leaf blight of garlic caused by *Pseudomonas syringae* pv. *porri* in Korea. *Plant Pathol. J.* 16: 177.
Madden, L. V. and Hughes, G. 1999. Sampling for plant disease incidence. *Phytopathology* 89: 1088–1103.
Madden, L. V., Hughes, G. and Ellis, M. A. 1995. Spatial heterogeneity of the incidence of grape downy mildew. *Phytopathology* 85: 269–275.
Myung, I. S., Joa, J. H. and Shim, H. 2011. Bacterial leaf spot of onion caused by *Pseudomonas syringae* pv. *porri*, a new disease in Korea. *Plant Dis.* 95: 1311.
Myung, I. S., Lee, Y. K. and Shim, H. 2012. Bacterial blight of shallot, caused by *Pseudomonas syringae* pv. *porri*, a new disease in Korea. *Plant Pathol. J.* 28: 454.
Nyrop, J. P. and Binns, M. R. 1991. Quantitative methods for designing and analyzing sampling programs for use in pest management. In *Handbook of Pest Management in Agriculture*, Vol. 2. ed. by D. Pimental and A. A. Hanson, pp. 67–132. CRC Press, Boca Raton, FL.
Samson, R., Shafik, H., Benjama, A. and Gardan, L. 1998. Description of the bacterium causing blight of leek as *Pseudomonas syringae* pv. *porri* (pv. nov.). *Phytopathology* 88: 844–850.
The Korean Society of Plant Pathology. 2009. List of plant diseases in Korea, 4th ed., pp. 188–189. (In Korean)
Turechek, W. W., Madden, L. V., Gent, D. H. and Xu, X. M. 2011. Comments regarding the binary power law for heterogeneity of disease incidence. *Phytopathology* 101: 1396–1407.