

박사학위논문

제주지역 감귤원에서 궤응애의
공간분포에 기초한 최적 표본조사법 개발



제주대학교 대학원

농화학과

송 정 흡

2003년 12월

제주지역 감귤원에서 궤응애의 공간분포에 기초한 최적 표본조사법 개발

지도교수 류 기 중

송 정 흡

이 논문을 농학박사학위 논문으로 제출함

2003년 12월

송정흡의 농학박사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

위 원 _____

위 원 _____

위 원 _____

제주대학교 대학원

2003년 12월

Development of Optimum Sampling Plan of Citrus Red Mite Based on Its Spatial Distribution in Jeju Citrus Groves

Jeong-Heub Song

(Supervised by Professor Key-Zung Riu)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF AGRICULTURE

2003. 12.

DEPARTMENT OF AGRICULTURAL CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목차	i
Summary	iii
I . 서론	1
II . 연구사	3
III . 재료 및 방법	9
1. 표본조사방법	9
가. 잎 채취조사	9
나. 육안조사	9
2. 공간분포와 축차표본조사법	10
가. 분산지수	10
나. 고정표본크기	11
다. 축차표본조사법	12
3. Kono-Sugino의 경험이항모델	13
4. 부(-)의 이항표본조사모델	15
가. 부(-)의 이항분포 상수 k	15
나. 부(-)의 이항표본조사법	16
5. 표본조사법의 유효성 평가	17

IV. 결과 및 고찰	18
1. 공간분포와 축차표본조사법	18
가. 곁응애의 공간분포 특성	18
1) 나무내 공간분포 특성	18
2) 나무내 및 나무간 분산지수	21
3) 나무간 공간분포 특성	39
나. 축차표본조사법	41
1) 단순축차표본조사법	41
2) 계층축차표본조사법	43
2. Kono-Sugino의 경험이항모델	51
3. 부(-)의 이항표본조사모델	58
가. 부(-)의 이항분포 상수 k	58
나. 부(-)의 이항표본조사법	63
4. 표본조사법의 유효성 평가	69
가. Green의 축차표본조사법	69
나. 고정표본크기 이항조사법	73
V. 종합고찰	78
VI. 인용문헌	85

Development of Optimum Sampling Plan of Citrus Red Mite Based on Its Spatial Distribution in Jeju Citrus Groves

Jeong-Heub Song

(Graduate School, Cheju National University)

SUMMARY

Integrated pest management, a decision making system of crop protection, is based on monitoring of both pest and beneficial organisms. This study was carried out to investigate the dispersion pattern and to develop optimum sampling plan of citrus red mite on satsuma mandarin in Jeju. Data were collected on citrus red mite densities and distributions over 4 years (1999~2002) by leaf sampling and visual inspection. Dispersion indices of citrus red mite were analyzed for intra- and inter-tree levels for the development of sequential and binomial sampling plans.

More female adults of citrus red mite were found on abaxial surface of leaf, while more male adults, nymphs and eggs were on adaxial surface of leaf. In low temperature season, e.g. April, the female adults of citrus red mite were more distributed on adaxial surface of leaf (55%). The percentage of citrus red mite female adults on abaxial surface of leaf were increased from May (57%) to August (80%) as temperature increased. The relationship between densities of citrus red mite female adults on abaxial surface of leaf (x) and those on total leaf (y) was linear: $\ln(y+1)=1.2083\ln(x+1)+0.0488$ ($r^2=0.97$). In Autumn, the female adults of citrus red mite were more distributed on fruit than on leaf as fruit matured.

Dispersion patterns of citrus red mite were analyzed by Iwao's patchiness regression (IPR) and Taylor's power law (TPL). TPL provided better

description of mean-variance relationships of citrus red mite than IPR did. Aggregated patterns of spatial distribution was observed over all developmental stages of citrus red mite in order of egg > nymph > adult. Distribution pattern at adult stage between adaxial and abaxial of leaf was not differed, whereas those at nymph and egg stages were differed. Distribution pattern over each developmental stages between outside and inside of tree was not differed.

In simple sequential sampling plan using the parameters of TPL of intra- and inter-tree with sample unit of 10 leaves at action threshold of 2.0 female adult mites per leaf, the required number of trees sampled were 3 and 6, respectively. This indicated that the dispersion pattern of leaf as well as tree must be considered in development of sequential sampling plan. The required number of leaves per tree was 10, and the required number of sampled trees was 23 by sequential cluster sampling plan. Sequential sampling program for decision making based on action thresholds, 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf by interval estimates was obtained. The higher action threshold was, the wider range between upper and lower limit was.

Binomial sampling plan is based on the relationship between density of citrus red mite per leaf (m) and proportion of infested leaves (P_T). T is the tally threshold. The precision levels of model were affected by tally threshold, but not affected by sample size. The precision level was the highest at $T=2$ among $T=1, 2$ and 3 , and within the P_T range of $0.2\sim 0.9$ which were equivalent to $0.9\sim 6.3$ mites per leaf. In operating characteristic (OC) and average sample number (ASN) curves, probability of incorrect classifying was around 0.5 and ASN was maximum at action threshold. The density range of incorrect classifying was reduced, as the minimum sample size increased. An empirical binomial sampling program for decision making based on action thresholds, 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf was developed.

The negative binomial probability distribution were followed 93.6% among count data for number of citrus red mite based on chi-square tests. A common

k (k_c) of 1.2874 was computed but appeared more suitable for mean densities range of 1.6~11.8 mites per leaf. For mean densities range of 0.02~11.8 mites per leaf, the parameter k of negative binomial was related to mean density(m): $k=0.7885+0.2896\times\log_{10}(m)$.

The negative binomial sampling plan was developed by basic and Wilson and Room's model. The relationship between mean densities and proportion of infested leaves with at least T mites (P_T , in this study $T=1, 2$ and 3). Wilson and Room's model was the best described at $T=1$ ($r^2=0.99$). OC, proportion of incorrect classifying, was near 0.5 at action threshold level. The range of incorrect decision was decreased with increasing minimum sample number. The remainder of minimum sample number from ASN was decreased with increasing the minimum sample number. Results of the study was summarized as a decision making table.

The validation of sampling plan was performed based on the independent data which were not used for development of sampling plan. Results of Green's sequential sampling plan for leaf and tree showed more precise than the fixed precision level. The required number of leaf was from 10 to 18 (e.g. 1 to 2 trees if 10 leaves per tree sampled) on fixed sample size binomial sampling plan. As a result of Wald's sequential probability ratio test and sequential cluster sampling plan, the required number of tree was increased at mean densities near the action threshold. The efficiency of sample size for an estimation procedure based on negative binomial sampling plan of Wilson and Room's model was found superior to any other models.

Here I propose the negative binomial sampling plan as the optimal with action threshold of 2 adult citrus red mites per leaf which is conventionally accepted. Following the guideline provided with the table and graph, IPM practitioners may facilitate the sampling and decision making process more precisely and efficiently, which eventually lead the economic and environment-friendly pest management system.

I. 서 론

귤응애 *Panonychus citri* (Mcgregor)는 제주지역의 감귤에 발생하는 중요한 해충 중의 하나이다(Kim *et al.*, 2000). 이 해충은 거미강 응애목에 속하며, 암컷의 체장은 0.45mm 내외, 수컷은 0.36mm 정도로 그 크기가 작다. 귤응애 암컷 성충의 모양은 타원형이고, 체색은 처음에는 밝은 적색을 띠지만 나중에는 짙은 적자색으로 변한다. 수컷 성충은 끝으로 갈수록 가늘어지는 복부 형태와 몸 크기에 비해 긴 다리를 갖고 있고, 몸 크기는 암컷보다 작다. 알에서 유충, 제1약충, 제2약충의 3단계를 거쳐 성충이 된다. 유충단계에서는 3쌍의 다리를 갖고 있으며, 알보다 약간 더 크다. 그리고 제1과 제2약충 단계에서는 4쌍의 다리를 갖고 있으며, 성충보다 약간 작다. 알은 적색 타원형이며, 일반적으로 잎과 어린가지에 낳는다.

귤응애 암컷 성충은 11~14일 동안 17~37개의 알을 낳는다. 알에서 성충까지의 발육기간은 온도 25℃, 상대습도 50~70%에서 암컷은 12일, 수컷은 11일이고, 성충 수명은 23일이다. 상대습도가 낮을 때에는 10일 동안에 밀도가 8.5배 증가하지만, 온도나 습도가 너무 높은 경우에는 오히려 감소하는 경향이 있다. 이는 성충 수명도 같은 경향이며, 이로 인해 제주지역에서도 무더운 여름에는 귤응애 밀도가 오히려 떨어지는 경향이 있다(김, 1997).

귤응애에 의한 감귤의 피해는 잎 표면 2~3개 세포층에서 전분 알갱이를 제외한 모든 세포액을 흡즙하여 광합성을 저해한다. 육안으로 나타나는 피해는 잎과 과실에 은회색의 얼은 색으로 굵은 자국이 나타나는데, 과실에서는 어릴 때 나타난 피해증상이 보통 착색이 되면서 사라진다. 그러나 과실이 성숙된 상태에서 피해를 받으면 그 자국이 계속 남아 있어 외관상 품질을 떨어뜨린다. 귤응애의 밀도에 따른 피해정도는 정확하게 밝혀져 있지 않지만, 심한 경우 기상에 따라 낙엽이 되거나 과실에 일소증이 발생하는 경우도 있다. 귤응애에 의한 수량감소에 대한 연구는 오렌지에서 4년 동안 조사한 결과, 잎당 평균밀도가 2.2과 7.1, 9.6마리일 때 각각 6.6와 9, 11.4%가 감소되었으며(Hare *et al.*, 1992), 라임에서 개화기부터 2개월 간 귤응애 밀도가 잎당 평균밀도가 5.2마리 이상이거나 3개월 간 4.3마리 이상, 4개월 간 3.9마리 이상일 때 모두 실질적으로 흡즙 피해가 발생하여 수량이 감소하였다(Childers and Abou-setta, 1999).

제주지역에서 곶응애는 연간 8~13세대정도 경과되는 것으로 알려져 있으며, 봄철(5~6월)과 가을철(9~10월)에 특히 발생이 많은데(Kim *et al*, 1978), 이 시기는 새로 발생한 순이 굳어지는 시기와 일치한다. 곶응애 방제는 연간 2~5회 정도 이루어지고 있으며, 이는 전체 병해충 방제비용의 20%를 점유하고 있다. 감귤재배 농가들이 곶응애 해충을 방제하는 관행을 보면 발생 예찰을 통해 해충의 발생여부를 관찰한 후에 방제여부를 결정하는 것이 아니라 습관적인 살충제의 살포와 주로 농가 자신의 경험이나 주변 농가 또는 농약 시판상의 권유에 의해 약제를 살포하고 있다. 이는 곶응애의 발생을 조장할 뿐만 아니라 방제가 더 어려워지게 되는 원인으로 작용하고 있다. 그러므로 농약의 살포회수를 줄여 생산비용을 절감함은 물론 안전 농산물 생산으로 고소득을 올리기 위한 최적 방제시스템 개발이 절실히 요구되고 있다. 곶응애 방제에 이용되는 농약을 주로 유기합성농약에 의존하기 때문에 이로 인한 약제 저항성 발달이 문제시되고 있다. 감귤원에서 다른 해충(진딧물, 총채벌레 등)을 방제하기 위하여 잔효 기간이 긴 광범위 살충제를 사용하면 이로 인해 천적이 감소되어 곶응애 밀도가 증가하는 것이 많은 경험을 통해 알려져 있다. 또한, 최근 친환경농산물에 대한 소비자의 수요가 급증하고 있을 뿐만 아니라 식품 안전성에 대한 요구가 증가하고 있어 이에 대한 대책 마련이 시급히 요구되고 있다. 이에 대한 대책으로 제시되고 있는 것이 병해충종합관리 기술의 도입이다. 유기합성농약을 최소화하면서 병해충에 의한 피해를 효율적으로 억제하는 방법이 필요하며, 발생하는 병해충에 대한 발생 예찰이 그 기초가 되어야 한다. 이를 위해서는 곶응애 밀도 추정에 따른 방제 의사결정 프로그램 개발 연구가 필요하지만 아직도 공간분포 및 표본조사에 대한 기초연구가 불충분한 실정이다.

따라서 본 연구는 감귤원 병해충종합관리 프로그램에서 가장 필요한 곶응애에 대해 나무 내 및 나무 간 공간분포의 특성을 밝히고, 이를 기초로 곶응애 밀도의 추정과 방제 의사 결정 프로그램을 개발하기 위하여 축차표본조사법과 이항표본조사법을 이용한 최적 표본조사법을 개발코자 수행되었다.

II. 연구사

제주지역 감귤에 피해를 주는 해충은 55종이며, 그 중 귤응애(*Panonychus citri* McGregor), 조팝나무진딧물(*Aphis citricola* van der Goot), 목화진딧물(*Aphis gossypii* Glover), 꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis* Pergand), 귤굴나방(*Phyllocnistis citrella* Stainton), 이세리아각지벌레(*Icerya purchasi* Maskell) 등이 주요해충으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2000). 특히 귤응애는 연간 8~13세대 발생하며, 잎과 열매에서 엽록소 등 식물체의 세포액을 흡즙하여 광합성 작용을 감소시키고 피해가 심한 경우에는 잎이 하얗게 탈색되어 조기낙엽을 유발하기도 한다(Lee *et al.*, 1991; Kim *et al.*, 1978).

귤응애의 천적으로는 유자에서 민깨알반날개 (*Oligota kashmirica* *benifica*), 깨알반날개 (*Oligota yasumatsui*), 꼬마무당벌레 (*Stethorus punctillum*), 칠성풀잠자리붙이 (*Chrysopa pallens*), 꼬마남생이무당벌레 (*Propylea japonica*), 애꽃노린재 (*Orius sauteri*), 응애총채벌레 (*Scolothrips takahashii*), 긴털이리응애 (*Amblyseius womersleyi*) 등이 알려져 있다(Kim and Choi, 2000). 제주지역에서도 깨알반날개와 애꽃노린재, 풀잠자리류, 마름응애 등 10여종이 있는 것으로 보고되어 있다(Catling *et al.*, 1977; Kim *et al.*, 1978). 그러나 유기합성농약 사용의 증가로 깨알반날개 2종, 꼬마무당벌레, 칠성풀잠자리붙이는 일반농가포장에서도 관찰은 되지만 밀도는 낮은 실정이며, 다른 천적은 무방제포장에서만 관찰이 가능할 정도이다.

귤응애는 알, 유충, 제1약충, 제2약충, 성충으로 발육하고 각 발육단계 사이에 protochrysalis, deutochrysalis, tritochrysalis라는 정지기가 있으며, 이 정지기에는 기주식물 표면에 붙어 있으면서 탈피하기 전에 새로운 큐티클층이 만들어진다(江原과 眞梶, 1996).

귤응애의 계절적인 발생소장과 위치는 온도가 낮은 겨울에는 햇빛에 관계없이 90% 이상 잎 뒷면에 존재하며, 온도가 상승함에 따라 잎 앞면에 존재하는 비율이 증가한다. 고온기에는 잎 표면에 귤응애가 많이 분포하지만 직사광선을 받는 잎보다 그늘진 곳에 위치한 잎에 더 많이 분포한다(眞梶, 1959; 1963). 온주밀감의 귤응애는 알에서 성충까지의 발육기간이 20℃, 22℃, 25℃, 28℃, 30℃, 32℃에서 각각

21.9일, 18.1일, 14.5일, 11.7일, 10.3일, 9.1일로 온도가 높아질수록 발육기간이 짧아진다(福田과 眞梶, 1954; 眞梶, 1959). 감귤원에서 귤응애 발생이 증가하는 시기와 감소하는 시기가 있을 뿐만 아니라 그 발생량에도 차이가 있는데, 이에 관여하는 요인으로는 기상, 천적, 응애습성 등이 알려져 있다(山田と西野, 1987). 일단 발생한 귤응애가 증가하기 시작하면 밀도가 급격히 상승하는데, 10일간의 증식률을 보면 15와 20, 25℃에서 각각 2.0과 3.0, 약5.0배로 증가한다.

귤응애 방제가 필요한 밀도(요방제밀도)에 대해서는 오렌지에서 0.5마리를 방제밀도로 하였고(Kennett, 1974), 감귤원에서 종합방제를 실시하는 경우 귤응애의 방제 밀도를 잎당 2마리로 하고 있다(Riel, 1978). 그러나 이들 값은 모두 구체적인 피해 해석에 기초를 두고 결정된 것은 아니다. 귤응애 피해를 많이 받은 감귤 잎은 건전한 잎에 비해 탄소동화량이 50%이하였고, 엽록소 함량은 20% 정도였으며(田畑, 1972), 잎의 피해정도, 낙엽율과 나무의 발육량 등의 관계로부터 피해허용수준이 잎당 최고발생마리수를 기준으로 5.5~6.6마리로 결정하였다(Furuhashi, 1978). 또한, 유자에서 발생밀도별 피해정도를 조사한 결과 잎당 성충밀도가 3마리 이하에서 방제하는 것이 월동후 낙엽율이 낮았다(Choi and Kim, 1998). 그러나 레몬에서 잎당 성충밀도가 19마리 이상 되더라도 과실의 크기나 수량, 품질에는 영향이 없었다(Hare *et al.*, 1992). 오렌지에서 귤응애 암컷 성충이 잎당 14마리 이상일 때 잎의 광합성 능력에는 뚜렷한 차이가 없었으며(Hare and Youngman, 1987; Hare *et al.*, 1989), 잎당 10마리 수준에서도 경제적 손실은 없었다. 그러나 응애 밀도가 높았을 때, 총수량의 10%정도 감소했지만 이는 다른 과실의 크기가 커지기 때문에 더 높은 가격을 받을 수 있어 그 경제적 효과가 상쇄되었다(Hare *et al.*, 1992). 사과응애에 의한 이듬해 사과 수량의 감소가 누적 응애일수가 1,250 이상일 때 나타났다(Hull and Beers, 1990). 귤응애에 의한 수량 감소는 겨울철 가뭄 등으로 인해 수분 스트레스를 받은 나무는 개화기부터 2개월 이상 잎당 평균밀도가 3.9마리 이상 유지되는 경우 그 피해로 인해 수량이 17~41%까지 감소되었다(Childers and Abou-Setta, 1999).

이와 같이 방제밀도에 대해서는 감귤의 종류와 보고한 학자에 따라 다르게 보고하고 있는 실정이다. 제주지역에서는 일반적으로 잎당 귤응애 성충 밀도가 2~3마

리 일 때 방제하는 것을 권장하고 있다. 미국 캘리포니아 대학에서는 방제밀도를 두가지로 제시하고 있는데, 그 한가지는 잎당 암컷 성충의 평균밀도가 2.0마리로 하고 있으며, 굴응애에 대한 포식응애인 *Euseius tularensis*의 비가 0.2이상이면 방제하지 않는 것으로 추천하고 있고, 이 때의 발생엽율은 0.73이었다. 또 다른 한가지는 잎당 암컷 성충의 평균밀도가 3~4마리로 하고 있는데, 이 때의 굴응애에 대한 *E. tularensis*의 비가 1.0보다 높을 때로 방제할 것을 추천하고 있으며, 잎당 암컷 성충의 평균밀도가 3.5마리일 때의 발생엽율은 0.85이었다(Flint, 1991).

제주지역과 비슷한 환경을 갖고 있는 일본에서는 피해허용밀도를 잎당 3마리로 하여 방제토록 하고 있다(靜岡縣經濟農業協同組合連合會, 1997). 즉, 감귤원의 대각선 방향으로 200매의 잎을 조사하여 발생엽율을 구한 후 과수원의 최대발생나무의 잎당 평균밀도가 3마리 이상 되는 나무가 나타나는 발생엽율 25~30%일 때 방제를 권장하고 있으며, 이 때의 잎당 평균밀도는 0.50~0.62마리였다.

근래 들어 유기합성농약에 의한 환경오염과 농산물의 안전성 문제 등으로 지금까지의 화학적 방제 일변도에서 농약사용을 줄일 수 있는 방법이 요구되고 있으며, 이의 한 방법으로 병해충종합관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 병해충종합관리의 목표는 고품질의 농산물을 생산하기 위해 유기합성농약의 사용을 최소화하는데 있다. 이를 위해서는 해충 발생에 대한 예찰 정보가 농약 사용에 대한 의사결정에 도움을 주므로 농약 사용을 줄이는 기본이 된다. 따라서 신뢰할 수 있고, 경제적인 해충 발생 예찰 방법은 병해충종합관리에서 절대적으로 필요한 구성요소이다(Ruesink and Kogan, 1982). 또한, 표본조사법은 불필요한 농약살포를 최소화하고, 해충을 경제적 피해수준 이하로 유지시키고자 할 때 다른 방제 방법의 이용가능 여부의 판단을 위한 해충밀도 평가에도 이용할 수 있다(Binns and Nyrop, 1992). 그러나 이와 같은 표본조사는 많은 시간이 소요되기 때문에 농가나 조사자가 이를 수행하기 위해서는 빠르게 의사를 결정할 수 있는 방법이 필요하다. 따라서 병해충종합관리에서 표본조사와 의사결정이 중요한 부분을 차지하므로 작물별, 해충별로 표본조사 방법의 개발과 세밀한 표본조사법을 만드는데 노력하고 있다. 병해충 종합관리에서 경제적이고 효과적인 의사결정을 위해서는 해충의 밀도를 추정하고, 밀도나 피해수준에 따라 방제여부를 결정하는 축차표본조사법을 개발, 이용할 수 있다. 축차표본

조사법은 다양하게 조사 표본수를 조정할 수 있기 때문에 고정된 조사 표본수에 기초한 방법보다 비용과 노력이 적게 드는 장점이 있다(Waters, 1955). 신뢰할 수 있는 굴응애 밀도와 경제적 피해수준과의 관계에 대한 정보는 감귤재배 농가에게 매우 중요하다. 굴응애 밀도가 경제적 피해 수준보다 높을 때는 약제를 살포해야 하지만, 그 반대의 경우에는 약제를 살포하지 않음으로써 방제비용을 절감함과 동시에 굴응애의 약제에 대한 저항성 발달을 억제하고 농약에 안전한 농산물을 생산할 수 있게 해준다(Horn, 1988).

해충 개체군의 분산에 관한 자료는 그 종의 개체와 서식처 사이의 상호작용에서 나타난 결과이기 때문에 개체군 생물학에서 중요한 측면이 있다(Sevacherian and Stern, 1972). 이 분산에 관한 지식은 곤충과 환경의 관계를 더 잘 이해할 수 있도록 해주며, 개체군 크기를 추정하기 위한 효율적인 표본조사 프로그램을 만들 수 있고(Harcourt, 1966; Sevacherian and Stern, 1972), 개체군 동태모델의 개발에도 이용된다(Croft and Hoyt, 1983).

표본조사시에는 여러 가지 요인을 고려해야 하는데, 특히 표본조사의 목적과 방법, 표본단위와 표본수를 분명하게 해야 한다. 이 요소들은 해충의 분산과 더불어 얻어진 추정밀도의 정확도 수준을 결정하게 된다. 표본단위의 선택은 계층을 나누어 생각할 수 있다. 두 가지 수준(과수원 내에서 나무, 나무 내에서 잎)에서 표본단위 조합의 선택은 각 수준에서의 공간분포를 반영하게 되어 중요하다(Shelton and Trumble, 1991). 공간분포의 종류는 크게 세가지로 나눌 수 있는데, 집중분포(aggregated distribution)는 절지동물의 특징이며, 고른분포(uniform distribution)는 드물고 주로 개체간 경쟁이 심한 경우에 발견된다. 그러나 임의분포(random distribution)는 생물계에서 거의 존재하지 않는다(Taylor, 1984; Shelton and Trumble, 1991).

해충관리에 이용되는 표본조사법 개발의 목표는 성공적인 의사결정에 필요한 해충 정보를 최소비용으로 얻는 것에 있다. 이를 위해서는 표본조사의 정확도와 함께 필요한 표본크기에 따른 비용을 동시에 고려해야만 한다. 이는 표본단위가 임의로 선택되기 때문에 수학적 모델을 통해 쉽게 이루어질 수 있다. 그 방법으로는 확률모델(probability model), 분산-평균 모델(variance-mean model)과 이항계수모델

(binomial count model)이 이용된다(Nyrop and Binns, 1991). 해충 밀도의 추정과 개체군 밀도의 분류방법은 해충관리프로그램에서 의사결정을 위해 중요하며, 이를 추정하는 방법으로 세가지 모델을 이용할 수 있다: 가변 단순모델(simple models of variability), 가변 복합모델(more complex models of variability), 이항표본조사(binomial sampling).

축차표본조사법을 이용하는 경우 표본크기를 고정표본크기에 비해 50~75% 정도 줄일 수 있으며, 이 경우 고정 표본크기 조사법과 비교했을 때 올바른 의사결정이 95%에 이르는 것을 보여줬다(Pieters, 1978; Shepard, 1980).

일반적으로 최소한 하나 이상의 곤충이 존재하는 표본단위의 비율(p_0)과 평균 간에는 적합한 관계가 있다(Gerrard and Chiang, 1970). 이는 표본 예측에 의해 평균 밀도를 추측할 수 있을 뿐만 아니라 많은 시간을 줄일 수도 있다. p_0 의 표본추정에 의해 평균밀도를 추정하는 표본조사법 개발에는 경험적 p_0 -m 모델이나 부(-)의 이항확률모델이 이용된다. T 개체보다($T>0$) 더 많이 있는 표본단위의 비율(P_T)을 이용하면 설명지수 k 에 독립적으로 평균밀도를 예측할 수 있다(Binns and Bostanian, 1988). $\ln(-\ln(P_T))$ 와 $\ln(m)$ 간에 직선적인 관계가 있으며, 이 관계는 P_T 를 이용하여 평균을 추측할 수 있을 뿐만 아니라 그 분산도 계산할 수 있다(Gerrard and Chiang, 1970). 이 관계를 기초로 하여 임계 평균밀도를 T 이하의 개체가 있는 표본단위의 비율로 대체한 의사결정을 위한 표본조사법을 개발해오고 있다(예. Hollingsworth and Berry, 1982; Margolies *et. al.*, 1984).

암컷 성충의 수로부터 표본의 총개체군을 예측할 수 있으며, 잎 뒷면에 하나 이상의 암컷 성충이 발생한 잎의 비율로부터 표본의 총개체군을 예측하는 발생엽 지수에 기초한 표본조사법을 개발할 수 있다(Jones and Parrella, 1984a). 이 표본조사법을 이용하면 곱응애 밀도와 수량감소와의 관계를 결정하기 위해 예찰되어야 하는 개체군 수준을 예측하는데 시간을 절약할 수 있다고 하였다. 또한, 곱응애의 나무내 및 나무간 분산지수와 일정 정확도에서의 표본조사법을 Iwao와 Taylor의 모델을 이용하여 산출하였는데, 나무내 분산은 Taylor의 모델이 더 적합하였고 나무간 분산은 두 모델 모두 적합하여 축차표본조사에 이용할 수 있다(Jones and Parrella, 1984b). 라임에서 먼지응애와 녹응애의 분산지수는 Taylor 모델이 Iwao 모델보다

두 종에 대한 분산-평균의 관계를 더 잘 설명하였으며, 모두 집중분포를 하였지만 분포형태는 달랐다(Pena and Baranowski, 1990). 오렌지 과수원에서 녹응애에 대해 공간분포를 조사한 결과 나무 내와 나무간, 일정면적간에는 집중분포를 하였으나, 대각선으로 조사하는 경우에는 다른 것으로 나타났다(Hall *et. al.*, 1994). 녹응애는 부(-)의 이항분포를 따르며, 평균밀도가 3.0~55.0마리의 범위에서 일반 k 를 갖고 있으며, 부(-)의 이항분포에 기초하여 녹응애 평균밀도는 1마리 이상의 응애가 있는 표본의 비율로부터 추정할 수 있었다(Hall *et. al.*, 1997).

사과응애에 대한 이항표본조사법은 여러 연구자에 의해 개발되어 왔다. 발생엽률-평균 모델을 적용하지는 않았지만, 발생엽율을 여러 계급(1~5%, 6~10% 등)으로 나누고 각계급별 \ln (평균)의 신뢰구간을 계산하여 발생엽율의 추정을 통해 응애 밀도의 등급을 나눌 것을 제안했다(Pielou, 1960). 부(-)의 이항분포에 대한 일반 k 값을 추정하고 부(-)의 이항분포를 이용하여 발생엽율로부터 응애 밀도를 추정하였다(Mowery *et. al.*, 1980). 응애 밀도의 등급을 나누기 위해 이항표본조사법을 이용하면 잎의 응애를 모두 계수하는 축차표본조사와 동일한 평균 표본수와 비슷한 빈도로 의사결정의 오류가 나타나며, 빠르고 정확하게 응애 밀도에 대한 의사를 결정할 수 있었다(Nyrop *et. al.* 1989). 이항표본조사법 개발에 응애 종류별로 여러작물에 대한 Taylor의 일반화한 상수를 이용하였으며, 평균밀도-발생엽율의 관계를 나타내었으며, 이를 이용하여 같은 응애에 대해 다른 작물에도 이용할 수 있었다(Jones, 1990).

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 표본조사 방법

가. 잎 채취조사

제주시와 북제주군, 남제주군의 농가재배 감귤원에서 1999년(3포장)과 2000년(5포장), 2001년(4포장) 3년 동안 4월부터 11월까지 7~10일 간격으로 귤응애를 조사하였다. 조사시에 농가가 귤응애 방제를 위해 농약을 살포한 경우에는 살포후 10~15일이 지난 후에 조사하였다. 조사한 온주밀감의 품종은 주로 궁천조생이었으며, 수령은 13~20년생, 조사포장의 면적은 0.5~1.2ha이었다. 온주밀감의 재배는 지역의 농가관행에 의한 병해충 방제 및 시비를 실시하였으며, 농가가 스스로 병해충 방제 시기 및 방제농약을 결정하였다.

조사나무의 선정은 조사포장의 형태 및 면적에 따라 나무수(1나무/0.05ha)를 조정하였으며, 조사일은 조사나무당 지상 60~120cm 높이에서 동, 서, 남, 북 4방향의 바깥쪽과 30cm 안쪽에서 완전히 성숙된 잎을 각 1매씩 임의로 택하여 나무당 총8잎을 채취하였다. 채취한 잎은 귤응애의 이동을 막기 위하여 hairspray를 뿌려주었으며, 1~3분간 spray액을 완전히 말린 후 zipper bag에 넣고 실험실로 가져와 해부현미경($\times 10$) 하에서 잎당 귤응애 밀도를 조사하였다. 잎간 분포조사는 귤응애 약·성충과 알의 밀도와 분산을 나무의 안쪽과 바깥쪽 그리고 잎의 앞면과 뒷면으로 구분하여 각 조사일에 조사 포장별로 계산하였다. 또한, 나무당 귤응애의 밀도와 분산은 조사한 8잎의 귤응애수를 합하여 각 조사일에 포장별로 계산하였다.

나. 육안조사

제주시, 서귀포시, 남제주군 및 북제주군의 일반농가 포장에서 2001년(9포장)과 2002년(8포장) 2년동안 4월부터 11월까지 7~15일 간격으로 귤응애 성충을 조사하였다. 조사한 포장의 면적은 0.8~1.2ha였으며, 나무 수령은 13~20년생이었다. 재배관리는 조사지역의 관행에 의해 시비와 농약을 사용하였으며, 농약은 병해충의 예방과 방제를 위해 농가가 스스로 결정하였다.

조사나무의 선택은 포장당 10~26주를 포장에 따라 임의로 선정하였고, 조사일

은 조사나무당 지상 60~120cm 높이에서 나무 바깥쪽의 잎 10매를 고르게 임의로 선택하여 꺾은에 암컷 성충수를 육안으로 조사하였다. 꺾은에 성충수는 조사일별로 잎의 앞면과 뒷면으로 구분하여 평균밀도와 분산을 구하였다. 나무당 밀도와 분산은 한 나무에서 조사한 꺾은에 성충수를 합산하여 계산하였다.

2. 공간분포와 측차표본조사법

가. 분산지수

분산지수는 분산-평균 관계에서 가장 일반적인 모델인 Taylor's power law(TPL)와 Iwao's patchiness regression(IPR) 두 가지 방법을 이용하였다(Taylor, 1961; Iwao, 1968). IPR은 잎당 평균밀도(m)에 대한 평균 군집도(\hat{m}^*)

$$\hat{m}^* = m + \frac{s^2}{m} - 1$$

의 회귀식

$$\hat{m}^* = a + \beta m$$

이다 (Iwao, 1968; Lloyd, 1967; Iwao and Kuno, 1971). 이 때 s^2 는 표본분산이고 m 은 표본평균이다. β 는 생물이 환경을 이용하는 형태(분포형태)와 관계되는 반면에 a 는 생물의 단위 면적당 밀도를 나타낸다.

TPL은 $s^2 = am^b$ 에 의한 분산-평균 관계로 상수 a 와 b 는 보통 $\ln(m)$ 에 대한 $\ln(s^2)$ 의 회귀식

$$\ln(s^2) = \ln a + b \ln(m)$$

에 의해 추정된다(Taylor, 1961; 1971). 기울기(b)는 종 특이적인 집중상수를 나타내는 것이고, 절편($\ln a$)은 환경, 표본조사 과정과 이용된 표본 단위에 관계되는 규모 요인이다. 상수 b 의 값은 분포형태를 특징짓는다: $b > 1$ 이면 집중분포(Taylor, 1961; Ruesink, 1980), $b = 1$ 이면 임의, 포아송분포(Horn, 1988)를 나타내고, $b < 1$ 이면 고른분포를 의미한다.

회귀식 상수를 추정하는데는 SAS(SAS Institute, 1999)의 일반선형회귀모델(PROC GLM)을 이용하였고, 각 선형 모델의 적합성은 결정계수(r^2)의 추정에 의해 평가하였다. 또한 회귀선의 기울기가 1.0보다 크다는 것은 Student t -test를 이용하

여 판정하였으며, 각 조사포장간 회귀식 절편과 기울기의 동일성은 공분산분석(ANCOVA)으로 검정하였다(Sokal and Rohlf, 1981). 또한, 공분산분석 결과 회귀직선의 기울기와 절편간에 차이가 없는 경우에는 일반 TPL 회귀식에 자료 전체를 이용할 수 있게 된다.

나. 고정 표본 크기

일정 정확도 수준($d=SE/m$, $SE=s/\sqrt{n}$)에서 개체군 밀도를 평가하려면 고정 표본 크기 조사법에서 표본의 크기(n)가 결정되어야 한다. 정해진 개체군 밀도에 기초한 표본조사법은 일정한 d 에서 n 이 정해진다:

$$n = \frac{s^2}{d^2 m^2}$$

여기서 s^2 는 평균에 대한 표본분산, d 는 정확도 수준이고, m 은 표본평균이다.

단순모형을 이용하는 경우에 주어진 d 에서의 표본추출중지선은

$$\ln T_n = [\ln(d^2/a)/(b-2)] + [(b-1)/(b-2)] \times \ln n$$

으로 계산할 수 있으며, 이 때 T_n 은 표본크기 n 까지의 누적수, n 은 표본크기, a 와 b 는 TPL 상수이다. 이 중지선을 추정하는데 d 값은 0.20과 0.25, 0.30을 이용했다. 이들 d 값은 일반적으로 사용되는 것으로 해충관리에 적용할 때 알맞은 것으로 알려져 있다(Southwood, 1978).

감귤원에서 표본조사는 두 계층으로 이루어져야 한다: 그 첫 번째 단위는 나무이고 두 번째 단위는 잎이다. 표본조사 계획은 정확한 분산의 구조와 표본조사 수준에 따른 분산을 이용하는 것이 중요하다(Nyrop and Binns, 1991). 본 연구에서 두 단계 표본조사는 각 수준(나무와 잎)의 TPL을 이용한 분산 모델을 이용하였다.

두 표본수준을 이용할 때 잎과 나무에서 곱응애 밀도의 추정평균에 대한 분산 ($Var(m)$)은

$$Var(m) = \frac{n_L S_B^2 + S_W^2}{n_L n_T}$$

으로 n_L = 나무당 잎수, n_T = 나무수, S_B^2 = 나무간 분산이고, and S_W^2 = 나무내 잎간 분산이다(Snedecor and Cochran, 1967).

그 값은 임의의 요인에 대한 분산모델의 요인분석을 통해 계산할 수 있다. TPL

에 의한 각 분산, S_B^2 와 S_W^2 ,은 개체군 크기에 따라 달라진다:

$$S_B^2 = a_B m^{b_B}; \quad S_W^2 = a_W m^{b_W}$$

여기서 a_B 와 b_B , a_W 와 b_W 는 각각 나무간과 잎간 TPL 상수이다.

Pringle & Giliomee(1992)는 이들 분산에 대해 TPL에 기초한 표본조사법을 제안하였는데, 주어진 정확도 수준(d)과 나무당 잎수(n_L)에 대해 조사해야 할 나무수(n_T)는

$$n_T = \frac{1}{(dm)^2} \left(\frac{n_L a_B m^{b_B} + a_W m^{b_W}}{n_L} \right)$$

이고,

조사나무수(n_T)에 대해 조사해야할 나무당 잎수(n_L)는

$$n_L = \frac{a_W m^{b_W}}{n_T (dm)^2 - a_B m^{b_B}}$$

이다.

다. 축차표본조사법

축차표본조사법에서 표본크기는 미리 결정되어 있지 않다. 즉, 조사과정에서 조사자는 누적한 정보에 기초하여 조사의 계속여부를 조사과정 중에 결정할 수 있기 때문이다. 개체군 밀도가 요방제밀도에서 멀수록 작은 표본수가 필요하게 된다 (Shepard, 1980; Wilson, 1985). 이와 같은 연속분류 표본조사법은 일반적으로 개체군을 분류하는데 매우 적은 관측수가 필요로 한다. sequential cluster sampling method (SCS)에 의해 나무간 분산과 잎간 분산에 기초한 표본조사법을 만들 수 있다 (Nyrop and Binns, 1991). 두 수준 표본조사에 대한 평균의 표준오차(SE)와 신뢰구간에 대한 식($m \pm z_{\alpha/2} SE$, 본 연구에서 정규편차단위 $z_{\alpha/2}=1.96$)은

$$m \pm z_{\alpha/2} \left(\frac{S_W^2 + n_L S_B^2}{n_T n_L} \right)^{1/2}$$

이다. SCS방법에 의해 표본조사는 요방제밀도 m_T 가 표본 평균의 신뢰구간 내에 있는 한 계속된다. 그 식은

$$m - z_{\alpha/2} SE \leq m_T \leq m + z_{\alpha/2} SE$$

이다. 해충의 누적수 T_n 에 대한 중지선은 신뢰구간에 표본크기($n_T n_L$)를 곱하여 계산한다:

$$n_T n_L \left(m_T \pm z_{\alpha/2} \left[\frac{S_W^2 + n_L S_B^2}{n_T n_L} \right]^{1/2} \right)$$

이는 점추정에서 분산으로부터 표준오차를 구하는 방법을 이용한 것이며, 구간추정에서 표준오차를 구하는 방법은 분산을 표본수로 나누어 계산하게 된다. SCS 방법에 따르면 나무당 조사할 엽수 n_L 가 우선 결정되면 요방제밀도 m_T 에 대한 일정 정확도 수준 d 를 얻기 위한 최대 조사나무수 n_{Tmax} 가 계산된다. 각 나무로부터 잎을 조사한 후 T_n 값이 상한선보다 위인지 아닌지가 조사된다. 그 값이 상한선보다 위에 있으면 조사를 중지하고 방제가 필요하다고 결정하며, 하한선보다 작을 때에도 조사는 중지하지만 방제가 불필요한 것으로 결론을 내린다. 그러나 조사한 값이 두 선 사이에 있으면 의사결정이 내려지거나 최대조사나무수가 조사될 때까지 계속하여 다른 나무를 조사한다.

최대조사나무수를 조사하였으나 T_n 이 조사선 사이에 있으면 의사결정을 위해 임계값을 사용해야만 한다. 임계값 $T_{critical}$ 을 계산하는 세 가지 방법은 다음과 같다: 경계값 $n_{Tmax} n_L m_T$, 평균에 대한 신뢰구간의 상한 ($n_{Tmax} n_L$) ($m_T + z_{\alpha} d m_T$) 그리고 평균에 대한 신뢰구간의 하한 ($n_{Tmax} n_L$) ($m_T - z_{\alpha} d m_T$). 각 경우에 최대나무수에 도달했다면 $T_n > T_{critical}$ 일 때 방제를 실시한다.

3. Kono-Sugino의 경험 이항 모델

평균밀도(m)와 잎당 굴응애가 T 마리 이상 발생한 엽율(P_T)간의 관계는 Kono and Sugino(1958)의 경험모델을 이용하였다:

$$\ln(m) = \alpha + \beta \ln[-\ln(1 - P_T)]$$

이 때, α 와 β 는 일반선형회귀모형 추정에 의해 추정된 상수값(SAS Institute, 1999)이다. 이 모델의 상수값은 한 잎에 존재하는 최소 굴응애 마리수인 tally threshold (T) 1, 2, 3에서 추정했다.

이항표본조사 계획의 정확도를 평가하기 위해서는 추정평균에 대한 유효 분산을 계산하여야 한다(Binns and Bostanian, 1990). 이 분산을 추정하는 방법은 여러 가

지가 있으나, 본 연구에서는 발생한 표본단위의 비율로부터 Schaalje *et al.*(1991)의 방법을 이용하여 추정평균의 분산($\text{var}[\ln(m)]$)을 추정하였다. 이는 T 에 따른 이항표본조사 계획의 정확도를 평가, 비교하는데 이용된다:

$$\begin{aligned} \text{var}(m) &= m^2[c1+c2+(c3-c4)] \\ c1 &= (\beta^2 P_T)/n(1-P_T)\ln(1-P_T)^2 \\ c2 &= MSE/N+\{\ln[-\ln(1-P_T)]-P_m\}^2 s_\beta^2 \\ c3 &= \exp\{\ln a+(b-2)[\alpha+\beta\ln(-\ln(1-P_T))]\}/n \\ c4 &= MSE \end{aligned}$$

이 때, MSE 는 $\ln(-\ln(P_T))-\ln(m)$ 회귀식의 잔차제곱평균, N 은 α 와 β 를 추정하는데 이용된 자료수, P_m 은 $\ln(-\ln(1-P_T))$ 의 평균값, s_β^2 는 β 의 분산 추정치, n 은 취한 표본수, a 와 b 는 Taylor's power law의 상수값이다(Taylor, 1961; 1971).

평균(m)에 대한 표준오차(SE)의 비가 정확도($d=(s^2/n)^{0.5}/m$)이며, s^2/n 을 $\text{var}(m)$ 식에서 대입하면

$$d = \sqrt{(c1 + c2 + (c4 - c3))}$$

이다. 추정된 평균(m)의 신뢰한계는 다음 식에 의해 계산하였다(Jones, 1994):

$$\ln m \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\ln m)}$$

이항표본조사에서 표본조사의 중지한계는 다음 식에 의해 계산하였다(Nyrop *et al.* 1989):

중지상한(UL)

$$UL = nP_T + z_{\alpha/2}n\{[P_T(1-P_T)]/n\}^{0.5}$$

중지하한(LL)

$$LL = nP_T - z_{\alpha/2}n\{[P_T(1-P_T)]/n\}^{0.5}$$

여기에서 P_T 는 요방제밀도에서의 T 마리 이상 곽응애 발생엽율, $z_{\alpha/2}$ 는 정규편차단위($z_{\alpha/2} = 1.96$)이다. 만일 응애가 있는 잎의 누적수가 UL 을 넘으면 조사를 중지하고 응애 밀도가 허용한계를 넘어선 것으로 분류하고, 반대로 LL 보다 더 작은 경우에는 응애가 한계밀도 이하로 분류하여 조사를 종료한다. 잎당 누적 곽응애수가 UL 과 LL 사이에 있으면 조사는 계속된다. 이들의 적합성을 조사하기 위하여 Resampling Validation for Sampling Program (RVSP)의 Wald's sequential

probability ratio test를 이용하여 작용특성(Operating Characteristic, OC)과 평균표본 수(Average Sample Number, ASN) 곡선을 구하였다. 이 두 곡선은 결정함수를 평가하는데 이용될 수 있는데, OC는 주어진 평균에 대해 귀무가설을 수락할 확률이며, ASN은 주어진 개체군 평균을 분류하기 위해 필요한 평균 표본수이다.

4. 부(-)의 이항표본조사 모델

가. 부(-)의 이항분포 상수 k

부(-)의 이항확률분포(Negative Binomial Distribution, NBD)는 평균(m)과 상수 k 에 의해 특징지어진다(Johnson and Kotz, 1969). 이 k 값은 NBD의 형태를 정의하며, k 값이 작을수록 집중도가 높아지는 일반적인 분포형태를 나타내기도 한다(Southwood, 1978). 본 연구에서 각 조사시기 및 포장별 k 값은 다음 식에 의해 구하였다:

$$\log\left(\frac{N}{n_0}\right) = k \cdot \log\left(1 + \frac{m}{k}\right)$$

이 때, N 은 총 표본수, n_0 는 곤통애가 발생하지 않은 엽수이고, m 은 평균밀도를 나타낸다(Southwood, 1978). 이 방법은 미지의 k 값을 구하는 가장 쉬운 방법으로 여러 k 값을 대입하여 두 변이 같아지는 k 값을 구하는 것이다.

표본이 여러 포장이나 다른 단위에서 취해졌을 때 각각은 다른 k 값을 갖게 된다. 이들과 하나의 일반 $k(k_c)$ 를 비교하는 것은 분산분석과 축차표본조사에서 자료의 변환에 중요하다. 추정된 281개의 k 값은 회귀과정을 이용하여 하나의 k_c 가 존재하는지를 조사하였다. 이는 각각의 자료에 대해 두 개의 통계량, $x' [=m^2 - (s^2/N)]$ 에 대한 $y' [=s^2 - m]$ 의 회귀식에서 구해진다. k_c 값은 회귀식 기울기의 역수가 되며, 적합성은 $\log_{10}(m)$ 에 대한 $1/k$ 의 회귀분석을 통해 얻은 회귀식의 통계적 유의성에 의해 평가했다: 이들 변수사이에 경향성이 존재하면 k_c 의 적합성을 의심하게 된다(Bliss and Owen, 1958; Bliss, 1958; Southwood, 1978).

부(-)의 이항확률을 나타내는 방법으로

$$P_x = \frac{(x+k-1)!}{x!(k-1)!} \cdot \left[\frac{k}{k+m}\right]^k \cdot \left[\frac{m}{k+m}\right]^x \quad x=0, 1, 2, \dots$$

이 때, P_x 는 x 마리의 곤통애가 존재하는 잎의 비율이다(Williamson and Bretherton, 1963). 관측된 평균밀도와 추정된 k 값을 이용한 부(-)의 이항 확률은 다음 식에 의해 계산하였다:

$$P_{x+1} = \frac{k+x}{x+1} \cdot \left[\frac{m}{k+m} \right] \cdot P_x \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

굴응애가 없는 ($x=0$) 잎의 비율은

$$P_{x=0} = \left[\frac{k}{k+m} \right]^k$$

이다. 이 때, P_x 는 x 마리의 굴응애가 있는 잎의 비율이다. 이 식을 이용하여 P_0, P_1, P_2, \dots 를 계산하였다. 이는 Microsoft Excel을 이용하여 연속확률을 계산하였으며, 잎당 굴응애가 20마리일 때까지 계산하였다. 카이제곱검정($\alpha=0.05$)과 상관분석을 통해 관측치와 추정된 k 값에 의한 NBD 기대치의 적합성을 검정하였다.

나. 부(-)의 이항표본조사법

부(-)의 이항표본조사법(Negative Binomial Sampling Plan, NBS)에서 k 값을 추정하는데 많이 이용되는 방법으로는 기본모델:

$$k = \frac{m^2}{(s^2 - m)}$$

과 TPL의 상수를 이용하는 Wilson & Room(1983)의 방법이 있다:

$$k = \frac{m}{(a m^{b-1} - m)}$$

여기서 a 와 b 는 TPL 상수이고 m 은 평균이다. 이는 분산이 강제적으로 TPL을 따르는 부(-)의 이항분포(NBD)가 된다(Kemp, 1987).

NBD의 기본모델은 다음식에 의해 얻어진다:

$$P(0) = \left(1 + \frac{m}{k} \right)^{-k}$$

여기서 $P(0)$ 는 발생하지 않은 잎의 비율, m 은 평균이고, k 는 설명상수이다. k^{-1} 은 TPL의 b 처럼 집중도를 나타낸다(Bliss and Fisher, 1953). 이 값은 분산-평균 관계식 또는 $P(0)$ -평균 관계식으로부터 얻을 수도 있다(Bliss and Fisher, 1953; Wilson and Room, 1983).

이들은 이 k 와 TPL 식을 이용하여 평균밀도와 $P(0)$ 의 관계식을 나타내었다:

$$P(0) = \exp \left[\frac{-m \ln(a m^{b-1})}{a m^{b-1} - 1} \right]$$

보통 $P(0)$ 보다 발생엽율 $P(I)(1-P(0))$ 를 더 자주 이용한다.

두 번째 방법은 잎당 일정 마리보다 많은 경우를 이용하여 더 높은 밀도를 추정할

수 있도록 Wilson and Room의 방법을 확장한 것이다. 이는 앞당 1, 2, 3 등 보다 많은 개체가 있는 잎을 추정하는 것이다. 이들 다른 빈도계급에 대한 기대확률은 다음 식에 의해 구해진다:

$$P_T = \frac{(k+T-1)m k^{-1}/(1+m k^{-1}) P_{T-1}}{T}$$

k 는 위의 식에서 계산되고, m 은 평균, T 는 표본단위인 잎에서 발견된 개체수이다 (Bliss and Fisher, 1953). 따라서 T 마리보다 많은 응애가 존재하는 잎의 비율(P_T)은

$$P_T = 1 - \sum_{i=0}^T P_i$$

이다.

평균밀도(m)와 앞당 곱응애가 T 마리 보다 많이 발생한 엽율(P_T)간의 관계, 95% 신뢰구간, OC와 ASN곡선을 구하는 방법은 Kono and Sugino의 경험모델과 같은 방법을 이용하였다.

5. 표본조사법의 유효성

이항표본조사법과 중지한계에 대한 유효성은 RVSP(Resampling Validation for Sampling Program)의 FSS(Fixed Sample Size)법과 SPRT(Wald's Sequential Probability Ratio Test)법을 이용하여 평가하였다(Naranjo and Hutchison, 1997). 각 독립된 자료에 대해 500 simulation을 실시하였으며, 방제밀도는 현재 방제시점으로 이용되고 있는 앞당 곱응애 밀도 2마리일 때의 발생엽율을 이용하였다. FSS 법에서는 표본수가 100일 때 예측된 평균에 대해 $T=1$ 에서의 실측평균과 비교하였고, SPRT법에서 상위경계와 하위경계는 OC의 값이 각각 0과 1이 되는 발생엽율로 하였으며, α 와 β 오류는 모두 0.100으로 하였다.

표본조사법을 평가하기 위하여 조사법 개발에 사용하지 않았던 독립된 자료에 대해 Microsoft Excel의 spreadsheet에 데이터베이스를 만들었다. 그리고 나무마다에 난수를 발생시킨 후 이를 정렬하여 나무마다의 누적응애수와 발생잎수를 계산하였으며, 이를 개발한 축차표본조사표와 이항표본조사표의 값과 비교하여 조사중지 나무수를 결정하였다. 이와 같은 방법으로 각 조사일에 대해 500회 반복하여 의사결정에 필요한 조산나무수의 평균과 중간값을 계산하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 공간분포와 축차표본조사법

가. 귤응애의 공간분포 특성

1) 나무 내 공간분포 특성

잎 표면에서의 귤응애 총태별 분포 특성은 1999~2001년에 걸쳐 6개의 감귤원에 서 조사한 100개 자료를 이용하여 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 1과 같다. 암컷 성충은 잎 앞면에 서식하는 비율이 62.3%로 뒷면보다 앞면에 더 많았으며, 나머지 총태는 잎 뒷면에 더 많은 것으로 나타났다(잎 뒷면: 수컷 성충 92.1%; 약충 83.8%; 알 60.8%). 이는 암컷 성충이 나무 바깥쪽 잎의 단단한 곳과 밝은 부위를 선호하기 때문이다. 그리고, 암컷 성충을 제외한 나머지는 잎 앞, 뒷면에서의 분포가 시기별로 크게 다르지 않았다.

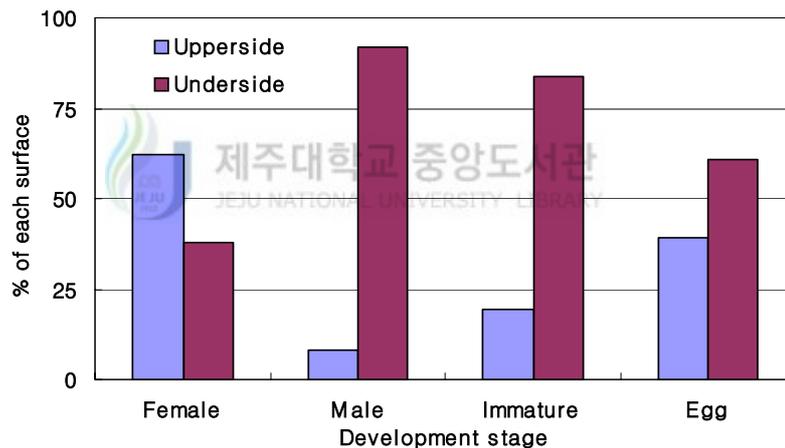


Fig. 1. Distribution patterns of various stages of citrus red mite, *P. citri*, on leaf surfaces.

시기별 잎 표면에서 귤응애 암컷 성충의 분포 비율 변화는 Fig. 2와 같다. 잎 앞면에서 귤응애 암컷 성충의 비율은 4월 조사에서 44.5%이었던 것을 제외하고 모든 조사시기에서 잎 앞면에 55%이상 존재하는 것으로 나타났다. 4월 이후 온도가 상승함에 따라 계속적으로 잎 앞면에서의 그 분포 비율이 증가하였으며, 8월을 정점

으로 온도가 낮아지면서 감소하는 경향을 보였다. 특히, 6~10월에는 잎 앞면에서 꿀응애 암컷 성충의 분포비율이 70% 이상이었으며, 8월에 79.8%로 가장 높은 분포 비율을 나타냈다.

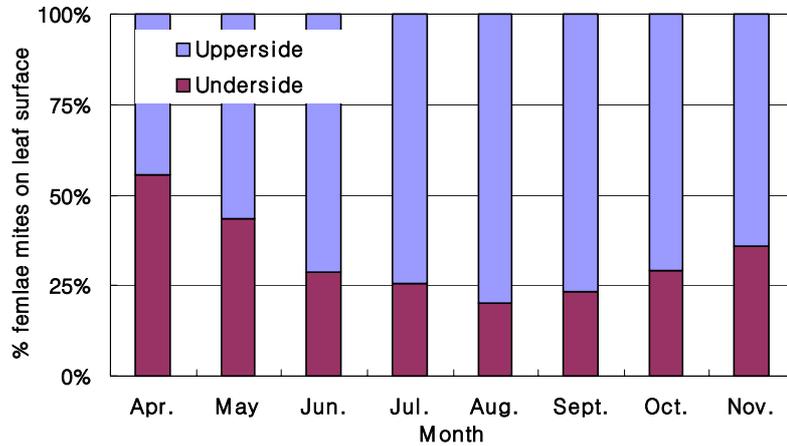


Fig. 2. Seasonal changes for distribution of female adult mites percentage on leaf surfaces.

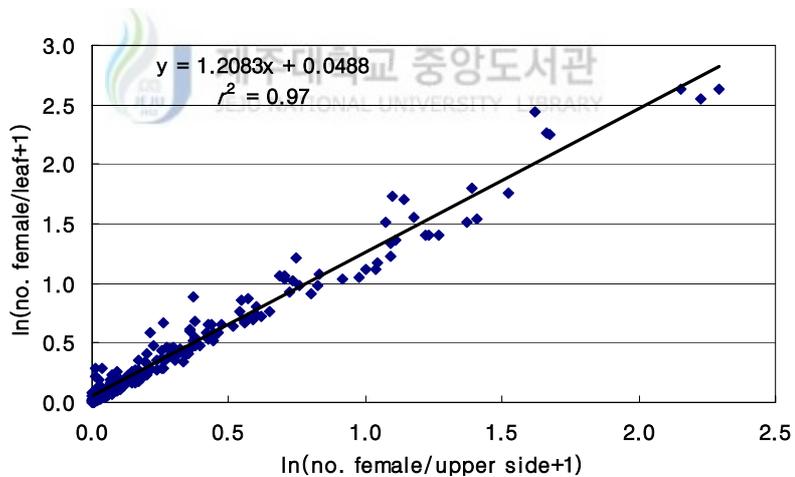


Fig. 3. Regression analysis of the female adults number of citrus red mite per upper-side leaf and both sides of leaf.

잎 앞면(x)과 잎 전체(y)의 꿀응애 암컷 성충 밀도의 관계는 Fig. 3과 같다. 이들

밀도에 대해 자연로그(ln)를 취하여 분석하였는데, 이들간에는 직선적인 관계가 있었으며, 결정계수가 0.97로 매우 높게 나타났다. 잎 전체당 평균 밀도가 1.0과 2.0, 3.0마리일 때 잎 앞면의 평균밀도는 각각 0.96과 1.70, 2.38마리였다.

잎과 과실에서 귤응애 성충의 밀도범위는 잎은 0.02~7.33마리, 과실은 0.01~16.15마리였다(Table 1). 과실의 성숙도가 다른 8~10월까지 잎(X)과 과실(Y)에서 귤응애 성충 밀도는 $\ln(Y+1)=1.029\ln(X+1)$ 의 직선적인 관계가 있었다($r^2=0.80$). 모든 조사시기에서 절편은 0과 차이가 없었으며, 회귀식의 기울기는 조사시기에 따라 차이가 있었다. 잎에 대한 과실의 응애밀도 비율이 8월과 9월에는 0.3과 0.7로 과실보다 잎에서의 밀도가 높았으나, 10월에는 1.12로 잎보다 과실에서의 귤응애 밀도가 더 높은 것으로 나타났다. 즉, 과실의 성숙도가 높아질수록 응애가 잎보다 과실에 더 많이 분포하는 것을 의미한다. 이의 원인은 과실이 성숙해짐에 따라 나무에 축적되었던 양·수분이 주로 과실로 이행되는 것과 온도가 낮아지는 환경요인 등이 관련이 있을 것으로 생각되지만 이에 대해서는 금후 구체적인 연구가 필요하다. 과실의 외관에 직접적인 피해를 일으키는 귤응애의 경제적 피해수준에 대해서는 현재 밝혀져 있지 않으나, 과실 착색기에 응애 밀도가 높으면 광택이 없어지고, 착색이 되어도 붉은 색이 적어져 담황색으로 된다. 또한, 가을철 귤응애의 발생 특징은 밀도 증가와 피해의 진전이 매우 빠르기 때문에 조기에 발견하여 방제해야 한다(大串, 1976).

Table 1. Relationships of $\ln(\text{mean number}+1)$ of citrus red mite female adults between per leaf and per fruit for different seasons

Season	n^a	Intercept $\pm SE$	Slope $\pm SE$	r^2
Aug.	5	0.014 \pm 0.023 ^b	0.312 \pm 0.044	0.94
Sept.	25	0.052 \pm 0.053 ^b	0.722 \pm 0.099	0.70
Oct.	33	0.013 \pm 0.063 ^b	1.124 \pm 0.075	0.88
Combined	63	-0.005 \pm 0.046 ^b	1.029 \pm 0.065	0.80
ANCOVA	F(2, 59)	5.67(P=0.0056)	17.07(P<0.0001)	

^a The number of sample used to calculate the regression statistics.

^b Coefficient not significantly different from 0.

나무 내에서 굴응애 암컷 성충은 잎 앞면에 더 많이 분포하지만 다른 충태는 뒷면에 더 많은 것으로 나타났다. 굴응애 암컷 성충의 4~11월까지 분포경향을 조사한 결과 고온기로 접어들수록 잎 앞면에서의 비율이 높아지고, 저온기인 4월은 잎 뒷면에 더 많은 경향이었는데, 이는 굴응애 암컷 성충은 저온기인 3~4월은 잎 뒷면에, 고온기인 7~8월에는 잎 앞면에 더 많았다는 眞梶(1959; 1963)와 김(1997)의 보고와 유사하였다. 이와 같은 결과는 암컷 성충이 다른 충태와 달리 잎의 단단한 곳(앞면)과 밝은 곳을 선호하기 때문에 활동온도가 낮은 저온기에는 잎 뒷면에 더 많이 분포하지만, 온도가 높아짐에 따라 선호하는 부위로 이동하여 잎 앞면에 더 많이 분포한다고 생각된다. 고온기에는 직사광선을 직접 받는 잎보다 그늘진 곳의 잎에 더 많이 분포하지만, 저온기에는 햇빛을 받는 잎에 더 많이 분포하는 것으로 알려져 있다. 또한 굴응애의 정상활동을 하는 온도의 범위는 10~38℃로 매우 넓은 것으로 알려져 있으며, 밝은 곳에 대한 선호성도 20℃ 전후의 온도에서는 매우 높으나, 저온(10℃) 또는 고온(30℃)의 온도에서는 선호성이 떨어진다. 따라서 20℃의 중간 온도에서는 빛에 대한 선호성이 높고 저온에서는 그 영향을 거의 받지 않으나, 고온에서는 오히려 선호성이 떨어졌다(眞梶, 1963). 굴응애 암컷 성충이 고온기인 6~8월에 앞면에 더 많이 분포하는 것은 김(1997)이 굴응애 알이 고온기에는 잎 앞면에, 저온기에는 잎 뒷면에 더 많았다고 한 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한, 이러한 암컷 성충의 분포는 거미줄을 이용 바람에 의한 나무내 및 나무간 분산과도 관계가 있을 것으로 생각된다.

2) 나무내 및 나무간 분산지수

잎 채취 조사에서 굴응애 발육단계별 나무내 분산지수는 Table 2와 같다. 이용한 자료의 수는 81개였으며, 굴응애 성충 암컷과 수컷의 밀도는 각각 잎당 0.01~3.01과 0.01~0.42마리였다. 약충의 밀도는 0.08~22.76마리였으며, 알의 밀도는 0.01~50.36개였고, 약·성충합계는 0.01~47.93마리였다. 암컷 성충에 대한 TPL의 결정계수(r^2)는 0.93~0.98이었으나, IPR은 0.16~0.90으로 TPL의 r^2 값이 높았다. 또한, TPL의 상수인 $\ln a$ 와 b 값의 변이의 폭($\ln a$: 0.70~1.02; b : 1.13~1.22)이 IPR의 α 와 β (α : 0.18~1.21; β : 1.30~1.98)보다 좁았다. 따라서 암컷 성충의 나무내 분산지수는 TPL이 IPR보다 더 잘 설명하였으며, 분포특징을 보여주는 TPL의 b 와 IPR의 β 값이 모두 1보다 커($P < 0.05$) 집중분포를 하는 것으로 나타났다. 연도간 및 조

사포장 간에 기울기(b 와 β)와 절편($\ln a$ 와 α)에 대한 공분산분석(ANCOVA)을 실시한 결과 IPR의 절편(α)을 제외한 F 값이 낮아 조사연도 및 포장간에 차이가 없었기($P>0.07$) 때문에 모든 자료를 조합하여 쓸 수 있었다.

수컷 성충의 회귀식의 r^2 값은 TPL 0.88~0.97로써 IPR 0.00~0.81보다 높았으며, TPL의 $\ln a$ 와 b 값의 범위($\ln a$: 0.28~0.99; b : 1.04~1.20)가 IPR의 α 와 β (α : -0.12~1.10; β : 0.63~7.25)보다 좁았다. 분포특성을 나타내는 TPL과 IPR의 기울기(b 와 β)값이 IPR의 회귀포장을 제외하고 모두 1보다 커($P<0.05$) 집중분포를 하고 있었다. 조사연도 및 포장간에 ANCOVA를 실시한 결과 $P>0.1$ 로 차이가 없었기 때문에 TPL은 모든 자료를 조합하여 사용하는 것이 가능하였다.

약충에 대한 회귀식의 r^2 값의 범위는 TPL 0.83~0.96으로 IPR 0.18~0.95보다 높았으며, TPL의 절편과 기울기의 변이 폭($\ln a$: 1.52~1.94; b : 1.15~1.41)이 IPR(α : 1.60~8.45; β : 1.09~2.96)보다 적었기 때문에 TPL이 IPR보다 더 잘 설명하였다. 분포특징인 두 모델의 기울기(b 와 β)가 모두 1보다 크기 때문에 집중분포를 하는 것으로 나타났다. 조사연도 및 포장간의 기울기와 절편값에 대해 ANCOVA를 수행한 결과 IPR의 조사연도를 제외한 나머지는 $P>0.1$ 로 차이가 없었다.

약·성충 합계에 대한 TPL과 IPR에 대한 분석을 실시한 결과 회귀식의 r^2 값의 범위가 TPL 0.91~0.99로 IPR 0.16~0.97보다 더 높았다. 회귀식 상수의 변이 폭은 TPL($\ln a$: 1.45~1.82; b : 1.20~1.46)이 IPR(α : 1.60~10.05; β : 1.00~2.54)보다 좁았다. 따라서 TPL이 IPR보다 약·성충의 분포를 더 잘 설명하였으며, 분포특징을 나타내는 기울기(b 와 β)값은 모두 1보다 커($P<0.05$) 집중분포를 하는 것으로 나타났다. 또한, 조사연도 및 포장간 회귀식 기울기(b 와 β)와 절편($\ln a$ 와 α)에 대해 ANCOVA를 실시한 결과 모두 $P>0.1$ 이었기 때문에 모든 자료를 조합하는 것이 가능하였다.

알에 대한 회귀식의 r^2 값의 범위는 TPL 0.67~0.97로 IPR 0.19~0.98보다 높았으며, 두 회귀식의 기울기와 절편의 범위는 TPL(b : 1.27~1.53; $\ln a$: 1.58~2.08)이 IPR(β : 1.00~2.04; α : 3.82~35.33)보다 폭이 좁아 TPL이 IPR보다 알의 분포를 더 잘 설명하는 것으로 나타났다. 알의 분포 특징을 나타내는 기울기(b 와 β)는 IPR의 회귀 포장을 제외한 나머지는 모두 1보다 커($P<0.05$) 집중분포를 나타내었다. 조사연도 및 포장간에 기울기와 절편에 대한 ANCOVA를 실시한 결과 연도간에는 차이가 있었으나, 포장간에는 차이가 없었다.

Table 3은 잎 표면에 따른 발육단계별 분산지수를 나타낸 것이다. 잎 앞면과 뒷면에 대한 r^2 값의 범위가 각각 TPL은 0.93~0.97, 0.90~0.95이었으나, IPR은 각각 0.01~0.72와 0.12~0.58로 TPL이 높았다. 암컷 성충과 수컷 성충의 경우 TPL과 IPR 모두 잎의 앞면과 뒷면에서의 분포 양상에 차이가 없었으나($P>0.1$), 약충과 알의 경우 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 성충을 제외한 충태에서 잎 앞면과 뒷면에서의 분포양상이 다르다는 것을 나타내는 것으로 잎 전체를 대상으로 조사해야 하는 것을 말한다.

나무내에서 잎의 위치가 나무 바깥쪽과 안쪽에서의 발육단계별 분산지수는 Table 4와 같다. 회귀식의 r^2 값의 범위는 TPL 0.91~0.98로 IPR 0.10~0.75보다 높았다. 수컷 성충의 IPR의 모든 절편과 안쪽의 기울기는 $P>0.05$ 로 차이가 없었다. 각 발육단계에 대한 TPL의 기울기와 절편은 나무내 잎의 위치에 대해 동일한 것으로 나타나 위치에 관계없이 자료를 이용할 수 있었다. 계절별 회귀식의 기울기와 절편은 암컷 성충은 IPR의 봄철 기울기, 수컷 성충은 봄철과 가을철의 기울기, 약충은 TPL의 여름철 기울기를 제외한 나머지는 나무 바깥쪽과 안쪽간에 차이가 없었다. 그리고 약·성충과 알은 TPL과 IPR의 기울기와 절편 모두 차이가 없었다. 꿀응애의 발육단계에 관계없이 봄철이 다른 계절에 비해 집중도가 높은 경향을 보였다.

나무의 바깥쪽과 안쪽에 위치한 잎의 충태별 나무간 분산지수는 Table 5와 같다. 회귀식의 r^2 값이 TPL(0.88~0.98)이 IPR(0.22~0.93)보다 높았고, 나무 바깥쪽과 안쪽의 기울기와 절편에 대한 변이의 폭이 TPL이 더 좁아 TPL이 분산형태를 더 잘 설명하였다. 수컷 성충에 대한 IPR의 절편값은 “0”과 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 분포양상을 나타내는 기울기의 값이 모두 1보다 커($P<0.05$) 집중분포를 하는 것으로 나타났다. 잎의 위치에 따른 회귀식의 기울기와 절편에 대해 ANCOVA를 실시한 결과 모두 $P>0.1$ 이었기 때문에 모든 자료를 조합하여 사용할 수 있었다.

꿀응애 암컷 성충에 대해 육안조사자료에 대한 조사연도 및 연도별 잎간 분산지수는 Table 6과 같다. 분석에 이용한 자료의 수는 321개였으며, 잎당 평균밀도는 0.01~12.99마리였다. 회귀식의 r^2 값의 범위는 TPL 0.91~0.99로 IPR 0.44~0.99보다 더 높았고, 회귀식의 기울기와 절편의 변이는 TPL 1.20~1.46과 0.69~1.33으로 IPR 1.28~2.31과 0.24~1.82보다 변이의 폭이 적어 TPL이 분산형태를 더 잘 나타내었다. 모든 기울기의 값이 1보다 커($P<0.05$) 집중분포를 하는 것으로 나타났다. 조사연도 및 포장간 회귀식의 기울기와 절편에 대해 ANCOVA를 실시한 결과 TPL은

모두 $P>0.05$ 였기 때문에 모든 자료를 조합하여 사용할 수 있었으나, IPR은 연도간 분석은 $P>0.05$ 였지만 조사포장간 분석은 $P<0.05$ 로 회귀식간에 기울기와 절편이 동일하지 않은 것으로 나타났다. 또한, 잎의 앞면에 대한 회귀식의 기울기와 절편은 TPL은 1.2241와 0.8759, IPR은 1.7629와 0.5483이었으며, r^2 값은 각각 0.95와 0.76으로 TPL이 더 잘 설명하였다. 잎 뒷면도 비슷한 경향이었으며, 잎 앞면과 뒷면 사이의 ANCOVA 분석결과에서 기울기와 절편이 동일한 것으로 나타났다.

굴응애 암컷 성충의 나무간 분산지수는 Table 7과 같다. 회귀식의 r^2 값의 범위는 TPL 0.80~0.98로 IPR 0.87~0.99보다 낮았으나, 그 기울기와 절편의 변이는 TPL이 각각 1.34~1.86과 -0.0198~0.74, IPR은 각각 1.15~1.67과 -1.29~2.81로 TPL의 폭이 좁게 나타났다. 또한, 조사포장 및 연도간 기울기와 절편에 대해 ANCOVA를 실시한 결과 TPL은 모두 $P>0.1$ 이었으나, IPR의 기울기는 모두 $P<0.0001$ 로 IPR은 모든 자료를 조합하여 사용할 수 없는 것으로 나타나 TPL을 이용하는 것이 알맞은 것으로 나타났다. 또한, 잎의 앞면에 대한 회귀식의 기울기와 절편은 TPL은 1.4698과 0.6076, IPR은 1.4008과 0.9526이었으며, r^2 값은 둘다 0.92였다. 잎 뒷면에 대한 회귀식의 기울기와 절편이 TPL은 각각 1.4343과 0.6373, IPR은 1.3357과 1.0629였으며, r^2 값은 각각 0.91과 0.94로 IPR이 약간 높은 것으로 나타났다. 잎 앞면과 뒷면 사이의 ANCOVA 분석결과에서 기울기와 절편이 동일한 것으로 나타났다.

굴응애의 발육단계별로 TPL 회귀식의 기울기(b)값을 비교해보면 알>약충>성충의 순으로 집중도가 다르게 나타났다. 이와 같이 발육단계별로 분산양상이 다른 것은 다른 곤충에서도 나타난다(Jansson and McSorley, 1990; Pena and Baranowski, 1990; Agrov *et. al.*, 1999). 알의 집중도가 가장 높게 나타난 것은 암컷 성충의 분포와 산란습성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 약충의 경우에는 제1약충의 경우 거의 이동성이 없으며, 3단계의 정지기 등으로 인해 집중도가 높았다고 생각된다.

잎(또는 나무)간 굴응애의 평균밀도와 분산간에 높은 관계가 있는 것은 Taylor (1961, 1965)의 결과와 같았다. 잎과 나무간의 굴응애의 분포는 집중분포를 하는 것으로 나타났는데, 잎보다 나무에서의 집중도가 더 높았다. 이는 레몬에서 굴응애 (Jones and Parrella, 1984), 라임에서 먼지응애와 녹응애(Pena and Baranowski, 1990), 사과에서 사과응애(Nyrop *et. al.*, 1989; Nyrop and Binns, 1991), 오렌지에서 녹응애(Hall *et. al.*, 1994)에 대한 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 굴응애가 집중 분포를 하게 되는 원인은 곤충 자체의 능동적 집중(행동과 번식 등)과 이질적인 환

경(미기상, 선호하는 식물 부위, 천적 등)에 의한다(Southwood, 1978). 또한, TPL 모델이 IPR보다 더 잘 설명하는 것으로 나타났는데, 이는 여러 농업해충에 대해 두 모델을 비교했을 때 보통 공간분포를 TPL이 더 적합하다는 것과 일치하였다(Nyrop and Wright, 1985; Asante *et. al.*, 1993; Ho, 1993; Walker and Allsopp, 1993; Peng and Brewer, 1994; Agrov *et. al.*, 1999).

TPL의 b 값은 표본단위의 선택에 따라 달라진다(Sawyer, 1989; Naranjo and Flint, 1994). 그리고 잎의 일부분과 같은 작은 표본 단위에서 해충을 조사하거나 가장 심하게 피해를 받는 부분의 잎을 선택한다면 표본조사에 대한 노력을 줄일 수 있다(Lynch and Simmons, 1993; Naranjo and Flint, 1994). 본 연구에서는 조사잎을 나무 안쪽과 바깥쪽으로 나누어 조사했을 때 두 부분간에 차이가 없었기 때문에 나무 바깥쪽에 위치한 잎만 조사하더라도 가능한 것으로 나타났다. 또한, 암컷 성충을 조사하는 경우 잎의 앞면과 뒷면을 모두 조사하지 않고 앞면만 조사해도 문제가 없는 것으로 나타났다.

해충의 집중도는 농약살포 등에 의해 달라지기 때문에 해충의 공간분포 추정엔 일반 관행재배 포장에서 해야한다는 결과(Trumble, 1985; Shelton and Trumble, 1991)와 기주식물에서 농약살포는 곤충의 분포에 영향이 없다는 보고(Sanderson and Zhang, 1995)가 있다. 그러나 본 연구에서는 굴응애 자체의 분포보다 제주지역에서 일반적으로 이용되고 있는 방제방법에 따른 공간분포의 특성을 파악하는 것이 필요하기 때문에 일반 농가의 관행재배 포장에서 조사한 자료를 이용하였다.

Nyrop and Binns(1991)는 과수원에서 계층축차표본조사의 중요성을 강조했다. 본 연구에서는 계층축차표본조사법을 만들기 위하여 암컷 성충에 대한 나무간 분산에 TPL 모델을 적용하였다. 나무간 분산지수에서 상수 $\ln a$ 의 값이 1 보다 작아 낮은 밀도에서는 임의분포를 할 가능성이 있었으나, 나무내에서의 분포에서 그 값은 1 보다 컸다. 이는 축차표본조사에서 계층축차표본조사법을 사용하는 것이 타당하다는 것을 보여주고 있다.

굴응애에 대한 예찰 및 방제가 일반적으로 3~10월에 이루어지고 있고, 그 기간 동안 잎에 존재하는 굴응애는 모든 발육단계가 있다. 그러나 약충과 알의 경우 육안으로 조사가 어려우며, 일반적으로 방제밀도를 추정할 때 잎당 암컷 성충의 밀도를 이용하기 때문에 암컷 성충에 대한 표본조사법을 개발하는 것이 알맞을 것으로 판단된다.

Table 2. Inter-leaf dispersion indices for various stages of citrus red mite, *P. citri*, by leaf sampling in Jeju

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Female							
Year							
1999	20	0.7303±0.0962	1.1804±0.0344	0.98	0.1775±0.0676	1.9386±0.1569	0.90
2000	34	1.0151±0.1180	1.2180±0.0556	0.94	0.8776±0.2821	1.8216±0.4457	0.34
2001	15	0.6998±0.1276	1.1305±0.0442	0.98	0.3940±0.1645	1.4474±0.1644	0.86
Field							
Wolsan A	13	0.8034±0.1095	1.1906±0.0365	0.99	0.1923±0.1198 ^b	1.9751±0.1954	0.90
Wolsan B	25	0.7299±0.1115	1.1646±0.0413	0.97	0.3088±0.1111	1.8165±0.2708	0.66
Ora	18	1.0131±0.1929	1.2024±0.0831	0.93	0.8454±0.4511 ^b	1.9788±1.1486 ^b	0.16
Hoicheon	13	0.9212±0.1673	1.1490±0.0960	0.93	1.2136±0.5275	1.3029±0.4187	0.47
Combined	69	0.8854±0.0732	1.1944±0.0291	0.96	0.5872±0.1438	1.6791±0.2095	0.48
ANCOVA							
Year	$F_{(2, 65)}$	2.63(P=0.0799)	1.28(P=0.2862)		4.27(P=0.0181)	2.15(P=0.1244)	
Field	$F_{(3, 64)}$	1.65(P=0.1875)	1.06(P=0.3722)		2.19(P=0.0979)	0.60(P=0.6156)	
Male							
Year							
1999	5	0.9851±0.6075 ^b	1.2025±0.1544	0.95	0.0964±0.3712 ^b	7.2487±8.6389 ^b	0.19
2000	18	0.7957±0.3280	1.1627±0.0953	0.90	0.3441±0.3770 ^b	3.3805±3.2946 ^b	0.06
2001	9	0.3420±0.3877 ^b	1.0402±0.1053	0.93	0.3057±0.2886 ^b	1.1636±2.5443 ^b	0.03
Field							
Wolsan A	9	0.2777±0.2895 ^b	1.0368±0.0720	0.97	0.1492±0.1215 ^b	1.4755±2.4231 ^b	0.05
Wolsan B	8	0.5228±0.1964	1.1323±0.0557	0.99	-0.1230±0.0637 ^b	5.6784±1.1334	0.81
Ora	6	0.4633±0.6535 ^b	1.0768±0.1941	0.88	0.2789±0.5068 ^b	1.3352±10.0684 ^b	0.00
Hoicheon	9	0.8591±0.4917 ^b	1.1163±0.1473	0.89	1.0991±0.8233 ^b	0.6306±4.5268 ^b	0.00
Combined	32	0.6596±0.2213	1.1235±0.0616	0.92	0.3094±0.2231 ^b	2.7835±2.1008 ^b	0.02
ANCOVA							
Year	$F_{(2, 28)}$	0.03(P=0.9665)	0.00(P=0.9961)		0.11(P=0.8985)	0.21(P=0.8141)	
Field	$F_{(3, 27)}$	1.71(P=0.1880)	1.39(P=0.2667)		1.49(P=0.2405)	0.30(P=0.8247)	

Table 2. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Immature							
Year							
1999	25	1.5602±0.1316	1.3439±0.0679	0.94	1.6697±0.3711	2.2569±0.1839	0.87
2000	38	1.8517±0.1186	1.3834±0.0858	0.88	5.0582±1.5402	2.1976±0.7731	0.18
2001	18	1.6477±0.0968	1.3239±0.0352	0.99	1.8647±0.5915	1.6121±0.0875	0.95
Field							
Wolsan A	13	1.7281±0.1908	1.3998±0.0901	0.96	3.2041±1.2690	1.8203±0.2772	0.80
Wolsan B	30	1.5236±0.1138	1.3215±0.0547	0.95	1.6009±0.4985	2.4917±0.3655	0.62
Ora	25	1.9436±0.1542	1.4051±0.0807	0.93	3.2217±1.0959	2.9611±0.5409	0.57
Hoicheon	13	1.9444±0.2099	1.1549±0.1567	0.83	8.4469±3.2073	1.0928±0.4556	0.34
Combined	81	1.7352±0.0729	1.3651±0.0377	0.94	3.7258±0.6640	1.6887±0.1823	0.51
ANCOVA							
Year	$F_{(2, 77)}$	1.66(P=0.1962)	0.36(P=0.6989)		5.42(P=0.0063)	3.46(P=0.0364)	
Field	$F_{(3, 76)}$	1.53(P=0.2126)	0.75(P=0.5252)		2.05(P=0.1139)	2.04(P=0.1156)	
Motile stages							
Year							
1999	25	1.4694±0.1120	1.3617±0.0691	0.94	1.5950±0.3348	2.0390±0.1389	0.90
2000	35	1.7451±0.0939	1.3331±0.0714	0.91	5.5454±1.7458	1.7431±0.6740	0.16
2001	19	1.5733±0.0939	1.3357±0.0376	0.99	1.8235±0.5396	1.5443±0.0711	0.97
Field							
Wolsan A	13	1.6650±0.1750	1.4559±0.0967	0.95	3.1712±1.2017	1.7476±0.2313	0.84
Wolsan B	30	1.4491±0.1073	1.3238±0.0587	0.95	1.7401±0.5286	2.1167±0.3016	0.64
Ora	24	1.8009±0.1091	1.3691±0.0622	0.96	2.5559±0.6494	2.5386±0.2783	0.79
Hoicheon	12	1.8180±0.1444	1.1957±0.0948	0.94	10.0515±4.0536	1.0024±0.4855	0.28
Combined	79	1.6254±0.0590	1.3600±0.0336	0.95	3.6595±0.7130	1.5931±0.1658	0.54
ANCOVA							
Year	$F_{(2, 76)}$	2.80(P=0.0674)	0.79(P=0.4587)		4.99(P=0.0092)	2.08(P=0.1317)	
Field	$F_{(3, 75)}$	1.88(P=0.1412)	1.12(P=0.3451)		2.69(P=0.0523)	0.92(P=0.4359)	

Table 2. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\hat{\mu} \pm SE$	r^2
Egg							
Year							
1999	14	1.5823±0.0920	1.5193±0.0613	0.98	3.8172±0.8804	1.6943±0.0652	0.98
2000	38	1.9405±0.1571	1.5294±0.0763	0.92	13.9114±4.7056	1.9378±0.3171	0.51
2001	19	1.9336±0.1011	1.3215±0.0450	0.98	6.0562±1.1929	1.3898±0.0650	0.96
Field							
Wolsan A	13	2.0771±0.2767	1.3065±0.1440	0.88	11.7438±3.7672	1.3316±0.2257	0.76
Wolsan B	25	1.7985±0.0916	1.4419±0.0532	0.97	5.4226±1.4801	1.8517±0.1709	0.84
Ora	20	1.9907±0.1101	1.4966±0.0602	0.97	7.0570±2.5203	2.0373±0.1862	0.87
Hoicheon	13	2.5548±0.7447	1.2683±0.2697	0.67	35.3315±15.1947	1.0013±0.6069 ^b	0.19
Combined	71	1.9160±0.0811	1.4567±0.0403	0.95	10.2496±2.5343	1.7036±0.1623	0.61
ANCOVA							
Year	$F_{(2, 67)}$	3.50(P=0.0359)	5.02(P=0.0093)		5.41(P=0.0066)	4.93(P=0.0100)	
Field	$F_{(3, 66)}$	0.97(P=0.4121)	0.70(P=0.5562)		3.09(P=0.0329)	0.68(P=0.5680)	

^a The number of m and s^2 or \bar{m} pairs used to calculate the regression statistics.

^b Coefficient not significantly different from 0.

Table 3. Dispersion indices for various stages of citrus red mite, *P. citri*, on different leaf surfaces by leaf sampling in Jeju

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln \alpha \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$\alpha \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Female							
Upper	59	0.8826±0.0811	1.1976±0.0286	0.97	0.4318±0.1569	2.0311±0.3204	0.41
Lower	54	0.6946±0.1287	1.1355±0.0432	0.93	0.4494±0.2124	1.9898±0.7346	0.12
Combined	113	0.8110±0.0716	1.1734±0.0247	0.95	0.4396±0.1272	2.0191±0.3129	0.27
ANCOVA $F_{(1, 110)}$		0.17(P=0.6791)	0.05(P=0.8152)		0.00(P=0.9643)	0.00(P=0.9821)	
Male							
Upper	11	0.2526±0.3322	1.0369±0.0831	0.95	0.1370±0.1732	1.2256±5.2497	0.01
Lower	32	0.7160±0.2484	1.1400±0.0686	0.90	0.2915±0.2474	1.9898±0.7346	0.12
Combined	43	0.6523±0.2050	1.1266±0.0551	0.91	0.2260±0.1847	3.4922±2.7156	0.05
ANCOVA $F_{(1, 40)}$		0.28(P=0.6014)	0.12(P=0.7275)		0.38(P=0.5389)	0.33(P=0.5692)	
Immature							
Upper	57	1.4617±0.1030	1.3622±0.0398	0.96	-2.1048±0.7590	2.1432±0.2556	0.72
Lower	81	1.7551±0.0750	1.3477±0.0364	0.95	3.6158±0.5926	11.3372±0.9600	0.47
Combined	138	1.6710±0.0618	1.3797±0.0269	0.95	2.2367±0.6071	1.6346±0.1957	0.34
ANCOVA $F_{(1, 135)}$		12.00(P=0.0007)	7.32(P=0.0077)		2.63(P=0.1070)	57.28(P<0.0001)	
Motile stages							
Upper	70	1.3195±0.0772	1.3502±0.0326	0.96	0.7640±0.2761	2.6024±0.2415	0.63
Lower	81	1.7450±0.0710	1.3399±0.0369	0.94	3.8448±0.6737	1.5902±0.2061	0.43
Combined	151	1.5915±0.0564	1.3781±0.0264	0.95	2.4757±0.3942	1.7809±0.1566	0.46
ANCOVA $F_{(1, 148)}$		28.53(P<0.0001)	12.69(P=0.0005)		11.95(P=0.0007)	0.10(P=0.7570)	
Egg							
Upper	69	1.9524±0.0746	1.3429±0.0442	0.93	6.9450±1.2834	1.6272±0.1751	0.56
Lower	71	1.8355±0.0699	1.4907±0.0380	0.96	5.9857±2.1358	2.2781±0.2318	0.58
Combined	140	1.9057±0.0519	1.4198±0.0293	0.94	6.3720±1.2547	2.0306±0.1505	0.57
ANCOVA $F_{(1, 137)}$		0.59(P=0.4429)	5.78(P=0.0176)		0.81(P=0.3698)	5.27(P=0.0232)	

^a See Table 2.

Table 4. Dispersion indices for various stages of citrus red mite, *P. citri*, with different seasons and leaf positions by leaf sampling in Jeju

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Female							
Spring	59	1.0017±0.0924	1.2736±0.0329	0.96	0.0599±0.0853 ^b	3.5955±0.2340	0.80
Outside	28	0.7663±0.1090	1.2118±0.0388	0.97	0.0561±0.0852 ^b	2.6246±0.2701	0.78
Inside	31	1.2418±0.1365	1.3393±0.0485	0.96	0.1391±0.1216 ^b	4.0480±0.3014	0.86
Summer	68	0.8778±0.0765	1.2160±0.0329	0.95	0.5794±0.1872	1.7625±0.2963	0.34
Outside	35	0.8551±0.0879	1.2205±0.0361	0.97	0.3601±0.1264	1.9124±0.1921	0.75
Inside	33	0.8952±0.1268	1.2066±0.0575	0.93	0.8668±0.3863	1.4839±0.6413	0.15
Fall	49	0.5764±0.0787	1.1353±0.0315	0.96	0.3035±0.0881	1.3839±0.1110	0.76
Outside	25	0.5011±0.1376	1.1176±0.0547	0.95	0.2133±0.1365	1.5726±0.2078	0.71
Inside	24	0.6362±0.0885	1.1460±0.0358	0.98	0.3828±0.1118	1.2760±0.1223	0.83
Combined	176	0.8111±0.0482	1.2062±0.0189	0.96	0.3857±0.0844	1.8035±0.1380	0.49
Outside	88	0.7369±0.0630	1.1936±0.0244	0.97	0.2465±0.0702	1.8609±0.1228	0.73
Inside	88	0.8760±0.0718	1.2150±0.0287	0.95	0.5293±0.1534	1.7407±0.2363	0.39
ANCOVA							
Leaf position	$F_{(1, 173)}$	3.21(P=0.0750)	1.41(P=0.2359)		2.89(P=0.0910)	0.24(P=0.6277)	
Season							
Spring	$F_{(1, 56)}$	3.95(P=0.0518)	0.90(P=0.3465)		5.56(P=0.0219)	16.45(P=0.0002)	
Summer	$F_{(1, 65)}$	0.47(P=0.4947)	0.45(P=0.5061)		1.31(P=0.2574)	0.02(P=0.8848)	
Fall	$F_{(1, 46)}$	0.72(P=0.3998)	0.20(P=0.6571)		0.16(P=0.6912)	0.85(P=0.3602)	
Male							
Spring	22	1.0742±0.3452	1.2688±0.0974	0.89	-0.5170±0.2997 ^b	19.7092±4.7668	0.43
Outside	12	0.0030±0.0772 ^b	1.0013±0.0201	0.99	-0.0033±0.0225 ^b	1.0856±0.4886 ^b	0.33
Inside	10	1.9103±0.6615	1.5183±0.2106	0.87	-0.9464±0.6333 ^b	28.4411±8.0669	0.61

Table 4. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Summer	30	0.5913±0.2043	1.1256±0.0573	0.93	0.0886±0.1280 ^b	4.0630±2.1481 ^b	0.08
Outside	14	0.4287±0.2307 ^b	1.0998±0.0630	0.96	-0.0787±0.1331 ^b	5.5463±2.6141 ^b	0.27
Inside	16	0.6863±0.3268	1.1354±0.0938	0.91	0.2332±0.2092 ^b	3.0282±3.1581 ^b	0.06
Fall	18	0.5262±0.1065	1.1291±0.0329	0.99	0.0001±0.0710 ^b	2.6670±0.3924	0.73
Outside	10	0.7602±0.1167	1.2032±0.0360	0.99	-0.0848±0.0229	3.8618±0.1387	0.99
Inside	8	0.3259±0.1581 ^b	1.0647±0.0489	0.99	0.0899±0.1168 ^b	1.6185±0.5866	0.56
Combined	70	0.6330±0.1193	1.1444±0.0341	0.94	0.0643±0.1002 ^b	3.8249±0.9823	0.16
Outside	36	0.5022±0.0990	1.1232±0.0270	0.98	-0.0502±0.0362 ^b	3.7382±0.3908	0.71
Inside	34	0.6998±0.2149	1.1468±0.0646	0.91	0.2050±0.2085 ^b	3.6018±1.8779 ^b	0.10
ANCOVA							
Leaf position $F_{(1, 73)}$		2.81(P=0.0986)	2.22(P=0.1408)		2.34(P=0.1304)	0.69(P=0.4081)	
Season							
Spring $F_{(1, 19)}$		0.85(P=0.3689)	0.10(P=0.7531)		0.29(P=0.5965)	5.86(P=0.0257)	
Summer $F_{(1, 27)}$		1.82(P=0.1880)	1.50(P=0.2309)		1.50(P=0.2318)	0.36(P=0.5532)	
Fall $F_{(1, 15)}$		0.07(P=0.7968)	0.33(P=0.5750)		0.51(P=0.4852)	12.08(P=0.0034)	
Immature							
Spring	65	1.9359±0.1007	1.4911±0.0492	0.94	1.5087±0.7306	5.8984±0.6438	0.56
Outside	32	1.8380±0.1206	1.4476±0.0537	0.96	1.1777±0.5112	5.0486±0.5573	0.73
Inside	33	2.0152±0.1590	1.5361±0.0867	0.91	2.0567±1.3633 ^b	6.1583±1.0393	0.53
Summer	73	1.4620±0.0551	1.3701±0.0276	0.97	1.9072±0.3018	1.8349±0.1060	0.81
Outside	37	1.5195±0.0838	1.3282±0.0433	0.96	2.3923±0.4477	1.6986±0.1560	0.77
Inside	36	1.3993±0.0664	1.4071±0.0324	0.98	1.3512±0.3924	1.9995±0.1390	0.86
Fall	56	1.5270±0.0703	1.3687±0.0345	0.97	2.3072±0.3596	1.4795±0.0875	0.84
Outside	28	1.5250±0.1187	1.3419±0.0638	0.94	2.7090±0.6144	1.3523±0.1758	0.70
Inside	28	1.5230±0.0794	1.3864±0.0359	0.98	1.9660±0.3898	1.5515±0.0839	0.93

Table 4. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Combined	194	1.6060±0.0442	1.3908±0.0218	0.95	2.7168±0.3347	1.7328±0.1158	0.54
Outside	97	1.5924±0.0600	1.3582±0.0296	0.96	2.6038±0.3341	1.6119±0.1268	0.63
Inside	97	1.6157±0.0645	1.4220±0.0318	0.95	2.8597±0.5816	1.8107±0.1861	0.50
ANCOVA							
Leaf position $F_{(1, 191)}$		0.43(P=0.5107)	2.52(P=0.1140)		0.65(P=0.4209)	1.22(P=0.2703)	
Season							
Spring $F_{(1, 62)}$		0.13(P=0.7197)	0.15(P=0.6980)		1.58(P=0.2129)	1.88(P=0.1752)	
Summer $F_{(1, 70)}$		3.82(P=0.0547)	4.76(P=0.0325)		1.35(P=0.2500)	0.38(P=0.5421)	
Fall $F_{(1, 53)}$		0.18(P=0.6721)	0.58(P=0.4483)		0.44(P=0.5098)	0.56(P=0.4566)	
Motile stages							
Spring	68	1.8285±0.0943	1.5223±0.0531	0.93	1.4613±0.8966 ^b	5.1483±0.6063	0.52
Outside	34	1.6875±0.1225	1.4412±0.0626	0.94	1.1400±0.5163	4.1936±0.4576	0.72
Inside	34	1.9376±0.1401	1.6100±0.0890	0.91	2.1759±1.7266 ^b	5.3777±0.9806	0.49
Summer	74	1.4423±0.0544	1.4029±0.0314	0.97	2.0176±0.3221	1.8835±0.0772	0.89
Outside	37	1.4767±0.0826	1.3727±0.0503	0.96	2.5089±0.4954	1.7366±0.1196	0.86
Inside	37	1.4082±0.0712	1.4267±0.0393	0.97	1.4946±0.3934	2.0346±0.0936	0.93
Fall	56	1.4379±0.0617	1.3957±0.0366	0.96	2.5048±0.3736	1.4147±0.0674	0.89
Outside	28	1.4241±0.1008	1.3836±0.0671	0.94	2.8220±0.6324	1.3290±0.1307	0.80
Inside	28	1.4517±0.0744	1.4044±0.0402	0.98	2.2408±0.4188	1.4668±0.0680	0.95
Combined	198	1.5402±0.0408	1.4180±0.0235	0.95	2.9283±0.3905	1.6927±0.0978	0.60
Outside	99	1.5089±0.0558	1.3831±0.0324	0.95	2.6818±0.3427	1.5862±0.0933	0.75
Inside	99	1.5676±0.0594	1.4504±0.0340	0.95	3.2135±0.7017	1.7633±0.1636	0.55

Table 4. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
ANCOVA							
Leaf position	$F_{(1, 195)}$	0.03(P=0.8654)	1.56(P=0.2133)		1.40(P=0.2384)	1.74(P=0.1889)	
Season							
Spring	$F_{(1, 65)}$	0.20(P=0.6532)	0.92(P=0.3420)		1.66(P=0.2024)	2.12(P=0.1505)	
Summer	$F_{(1, 71)}$	0.69(P=0.4079)	1.03(P=0.3131)		0.43(P=0.5143)	1.69(P=0.1972)	
Fall	$F_{(1, 53)}$	0.02(P=0.8921)	0.05(P=0.8311)		0.17(P=0.6821)	0.54(P=0.4652)	
Egg							
Spring	40	2.1605±0.0777	1.6351±0.0422	0.98	9.2579±4.0258	3.3281±0.3914	0.65
Outside	20	2.0950±0.0854	1.6350±0.0450	0.99	8.1443±3.0585	3.0075±0.3263	0.83
Inside	20	2.2372±0.1404	1.6229±0.0786	0.96	10.7769±7.6616 ^b	3.5213±0.6888	0.59
Summer	69	1.7100±0.0775	1.4901±0.0369	0.96	8.6111±1.7372	1.6112±0.1013	0.79
Outside	34	1.7595±0.1035	1.4667±0.0488	0.97	9.2177±2.4806	1.5200±0.1378	0.79
Inside	35	1.6520±0.1187	1.5181±0.0569	0.96	7.7329±2.4778	1.7302±0.1523	0.80
Fall	56	1.6234±0.0708	1.4283±0.0413	0.96	5.3200±1.1321	1.5115±0.0841	0.85
Outside	28	1.6056±0.1063	1.4240±0.0635	0.95	5.1782±1.9530	1.5600±0.1541	0.80
Inside	28	1.6414±0.0973	1.4319±0.0554	0.96	5.4225±1.2226	1.4738±0.0861	0.92
Combined	16	1.7922±0.0503	1.4999±0.0262	0.95	8.7679±1.4845	1.7565±0.1024	0.64
	5						
Outside	82	1.7756±0.0658	1.4940±0.0342	0.96	8.4528±1.6348	1.6644±0.1126	0.73
Inside	83	1.8081±0.0775	1.5052±0.0406	0.94	9.0207±2.4943	1.8497±0.1723	0.59
ANCOVA							
Leaf position	$F_{(1, 162)}$	0.25(P=0.6195)	0.19(P=0.6645)		0.69(P=0.4060)	1.48(P=0.2255)	
Season							
Spring	$F_{(1, 37)}$	0.84(P=0.3660)	0.05(P=0.8179)		0.74(P=0.3946)	1.06(P=0.3095)	
Summer	$F_{(1, 66)}$	0.09(P=0.7698)	0.09(P=0.7624)		0.07(P=0.7852)	0.95(P=0.3328)	
Fall	$F_{(1, 53)}$	0.09(P=0.7646)	0.04(P=0.8492)		0.02(P=0.8844)	0.27(P=0.6087)	

^a, ^b See Table 2.

Table 5. Inter-tree dispersion indices for various stages of citrus red mite *P. citri* on different intra-tree by leaf sampling in Jeju

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$\alpha \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Female	123	0.7337±0.0519	1.2648±0.0348	0.92	0.8189±0.2173	1.3384±0.0739	0.73
Outside	62	0.6950±0.0684	1.2624±0.0439	0.93	0.5771±0.1932	1.3583±0.0690	0.87
Inside	61	0.7711±0.0788	1.2631±0.0554	0.90	1.0739±0.3945	1.3151±0.1281	0.64
ANCOVA	$F_{(2, 120)}$	0.50=0.4457	0.05=0.8216		1.39=0.2415	0.16=0.6910	
Male	52	0.6179±0.0985	1.2180±0.0504	0.92	0.1316±0.1885 ^b	2.0288±0.3850	0.34
Outside	23	0.6493±0.0874	1.2473±0.0433	0.98	-0.0361±0.0714 ^b	2.1853±0.1495	0.91
Inside	29	0.5912±0.1629	1.1918±0.0857	0.88	0.2735±0.3413 ^b	1.8883±0.2735	0.22
ANCOVA	$F_{(2, 49)}$	0.12=0.7359	0.33=0.5700		0.55=0.4605	0.03=0.8539	
Immature	154	1.2292±0.0525	1.4754±0.0300	0.94	4.0714±0.6443	1.3501±0.0426	0.87
Outside	78	1.2153±0.0717	1.4516±0.0423	0.94	3.6558±0.6376	1.2998±0.0468	0.91
Inside	76	1.2415±0.0774	1.4968±0.0430	0.94	4.5700±1.1314	1.3812±0.0685	0.85
ANCOVA	$F_{(2, 173)}$	3.21=0.0750	1.41=0.2359		2.89=0.0910	0.24=0.6277	
All motile	160	1.1680±0.0559	1.4870±0.0318	0.93	4.3498±0.6802	1.3135±0.0392	0.88
Outside	80	1.1468±0.0775	1.4618±0.0457	0.93	3.7635±0.6503	1.2855±0.0410	0.93
Inside	80	1.1901±0.0811	1.5080±0.0445	0.94	4.9903±1.1977	1.3301±0.0640	0.85
ANCOVA	$F_{(2, 157)}$	0.57=0.4495	0.95=0.3304		1.60=0.2078	1.10=0.2966	
Egg	140	1.1826±0.1092	1.5943±0.0365	0.93	14.1610±3.6724	1.3634±0.0580	0.80
Outside	70	1.1189±0.1383	1.6035±0.0466	0.95	12.4151±3.4020	1.3380±0.0530	0.90
Inside	70	1.2595±0.1741	1.5805±0.0579	0.92	15.8178±6.5936	1.3908±0.1055	0.72
ANCOVA	$F_{(2, 137)}$	0.48=0.4915	0.16=0.6853		0.78=0.3774	0.78=0.3798	

^{a, b} See Table 2.

Table 6. Inter-leaf dispersion indices for female adults of citrus red mite, *P. citri*, by leaf visual inspection in Jeju

Field (Year)	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln a \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$a \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
(2001)	184	1.1060±0.0374	1.3254±0.0216	0.95	0.8722±0.1410	1.9177±0.0810	0.76
Wolsan	21	1.0734±0.1688	1.2658±0.0886	0.91	0.7092±0.2443	2.1645±0.2930	0.74
Sumang	11	0.6947±0.0692	1.2003±0.0423	0.99	0.3001±0.2146 ^b	1.6157±0.2066	0.87
Euigwi	19	0.8212±0.0978	1.2096±0.0406	0.98	0.3118±0.1629 ^b	1.5929±0.0947	0.94
Namwon	19	0.7661±0.0810	1.2078±0.0351	0.99	0.2406±0.1114	1.7981±0.1261	0.92
Nakchun	29	1.1648±0.0943	1.4126±0.0772	0.93	1.1459±0.4402	1.9366±0.2788	0.64
Dukchun	22	1.2099±0.1398	1.3537±0.1009	0.90	0.7926±0.5256 ^b	2.7527±0.6913	0.44
Myongwol	25	1.3321±0.1026	1.4014±0.0523	0.97	1.0491±0.5503 ^b	2.1718±0.2174	0.81
Ahnsung	22	1.1625±0.0852	1.4575±0.0735	0.95	0.6743±0.3948 ^b	2.4110±0.3009	0.76
Jangjun	16	1.2093±0.1049	1.4263±0.0848	0.95	1.8159±0.6232	1.5479±0.1874	0.83
(2002)	137	0.9884±0.0391	1.2920±0.0213	0.96	0.5669±0.1633	1.8966±0.0802	0.81
Sangga	19	1.0753±0.0918	1.3670±0.0604	0.97	0.4517±0.2802 ^b	2.3148±0.2470	0.84
Nabeub	18	0.8896±0.0943	1.2584±0.0427	0.98	0.2462±0.1310 ^b	2.2036±0.2519	0.83
Jangjun	11	0.8971±0.0633	1.2951±0.0373	0.99	0.7193±0.2113	1.2820±0.0524	0.99

Table 6. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln \alpha \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$\alpha \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Wolpyong	17	0.7726±0.0647	1.2125±0.0318	0.99	0.3353±0.1386	1.6240±0.1213	0.92
Hawon	18	0.8555±0.1113	1.2458±0.0595	0.96	0.2500±0.2451 ^b	1.8925±0.1079	0.95
Gangjung	12	0.9344±0.1041	1.2587±0.0464	0.99	0.3168±0.1351	1.9610±0.1195	0.96
Sunheul	18	1.0121±0.0995	1.3300±0.0744	0.95	0.7071±0.1690	1.7065±0.0757	0.97
Shinchon	24	1.2346±0.1316	1.3378±0.0761	0.93	0.5857±0.6147 ^b	2.8206±0.2549	0.85
Part							
Upper	177	0.8759±0.0387	1.2241±0.0201	0.95	0.5483±0.1007	1.7629±0.0747	0.76
Lower	133	0.9269±0.0451	1.2298±0.0221	0.96	0.5472±0.0769	1.8228±0.0700	0.84
Total	321	1.0568±0.0273	1.3113±0.0154	0.96	0.7445±0.1066	1.9056±0.0569	0.78
ANCOVA							
Field							
2001	F _(8, 174)	1.86(P=0.0684)	0.78(P=0.6234)		2.13(P=0.0356)	2.98(P=0.0038)	
2002	F _(7, 128)	1.73(P=0.1074)	0.17(P=0.9905)		2.61(P=0.0148)	18.07(P<0.0001)	
Year	F _(1, 318)	3.43(P=0.0650)	0.05(P=0.8173)		2.97(P=0.0860)	0.97(P=0.3258)	
Part	F _(1, 307)	1.09(P=0.2983)	0.42(P=0.5169)		0.08(P=0.7788)	0.37(P=0.5439)	

^{a, b} See Table 2.

Table 7. Inter-tree dispersion indices for female adults of citrus red mite, *P. citri*, by leaf visual inspection in Jeju

Field	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln \alpha \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$\mu \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
2001	184	0.5176±0.0595	1.4875±0.0314	0.92	0.3742±0.3634 ^b	1.4222±0.0209	0.96
Wolsan	21	0.7408±0.1788	1.4180±0.1317	0.86	1.3343±0.9041 ^b	1.3925±0.1084	0.90
Sumang	11	0.5381±0.2022	1.4340±0.0971	0.96	1.2841±0.9921 ^b	1.2284±0.0955	0.95
Euigwi	19	0.5472±0.1259	1.4046±0.0699	0.96	0.5963±0.8597 ^b	1.2346±0.0500	0.97
Namwon	19	0.4667±0.1041	1.4026±0.0620	0.97	0.5388±0.3102 ^b	1.2264±0.0351	0.99
Nakchun	29	0.4069±0.1988	1.5358±0.0986	0.90	0.8462±0.6769 ^b	1.3455±0.0429	0.97
Dukchun	22	0.6852±0.2380	1.3417±0.1502	0.80	1.7205±0.7973	1.2176±0.1049	0.87
Myongwol	25	0.6173±0.1413	1.6100±0.0706	0.96	0.3389±1.2676 ^b	1.5832±0.0501	0.98
Ahnsung	22	0.0176±0.2487 ^b	1.6219±0.1198	0.90	0.5294±1.0528 ^b	1.3156±0.0803	0.93
Jangjun	16	0.1218±0.3262 ^b	1.6930±0.1369	0.92	1.3029±2.0914 ^b	1.3911±0.0631	0.97
2002	137	0.5966±0.0648	1.4827±0.0341	0.93	1.6850±0.4059	1.2742±0.0199	0.97
Sangga	19	0.2946±0.1865 ^b	1.6577±0.1074	0.93	0.8218±0.9273 ^b	1.4497±0.0817	0.95
Nabeub	18	0.5639±0.1402	1.5042±0.1083	0.92	0.0742±0.4297 ^b	1.6706±0.0827	0.96
Jangjun	11	0.4075±0.1781	1.6112±0.0816	0.98	2.8072±1.2962 ^b	1.1452±0.0321	0.99

Table 7. Continued

	n^a	Taylor's power law			Iwao's patchiness regression		
		$\ln \alpha \pm SE$	$b \pm SE$	r^2	$\alpha \pm SE$	$\beta \pm SE$	r^2
Wolpyong	17	0.7659±0.1412	1.3997±0.0760	0.96	1.4097±0.7716 ^b	1.2736±0.0675	0.96
Hawon	18	0.6338±0.2120	1.3551±0.1003	0.92	-1.2867±1.2623 ^b	1.5189±0.0555	0.98
Gangjung	12	0.8197±0.1482	1.4713±0.0911	0.96	1.1584±0.6142 ^b	1.4177±0.0543	0.99
Sunheul	18	-0.0198±0.2677 ^b	1.8579±0.1337	0.92	2.7481±1.3170 ^b	1.3154±0.0584	0.97
Shinchon	24	0.6979±0.1818	1.4085±0.0839	0.93	1.9912±0.9247	1.2152±0.0383	0.98
Part							
Upper	177	0.6076±0.0544	1.4698±0.0320	0.92	0.9526±0.3979	1.4008±0.0298	0.92
Lower	133	0.6373±0.0522	1.4343±0.0367	0.91	1.0629±0.2777	1.3357±0.0267	0.94
Total	321	0.5521±0.0438	1.4848±0.0231	0.93	1.0438±0.2801	1.3449±0.0150	0.96
ANCOVA							
Field							
2001	$F_{(8, 174)}$	1.39(P=0.2025)	1.59(P=0.1307)		1.21(P=0.2978)	6.66(P<0.0001)	
2002	$F_{(7, 128)}$	0.47(P=0.8538)	1.14(P=0.3395)		0.54(P=0.8037)	7.86(P<0.0001)	
Year	$F_{(1, 318)}$	1.20(P=0.2742)	0.41(P=0.5246)		0.00(P=0.9530)	20.20(P<0.0001)	
Part	$F_{(1, 307)}$	0.00(P=0.9604)	0.37(P=0.5439)		0.00(P=0.9530)	20.20(P<0.0001)	

^{a, b} See Table 2.

3) 나무간 공간분포 특성

잎과 나무간에 모두 집중분포를 하고 있는 것으로 나타났으며, 잎보다 나무간에 집중도가 더 높은 경향이었는데, 이는 한 과수원 내에서 잎당 평균 밀도가 나무들간에 다르다는 것을 보여주는 것으로 나무의 잎당 평균밀도별로 어떻게 분포하고 있는지를 아는 것은 중요하다. 왜냐하면 과수원의 잎당 평균밀도는 일정 밀도보다 낮더라도 이보다 밀도가 높은 나무들이 존재하기 때문에 포장 평균밀도는 낮더라도 특정 나무의 잎당 평균밀도가 경제적 피해수준보다 높아 굴응에 피해를 받을 수 있기 때문이다.

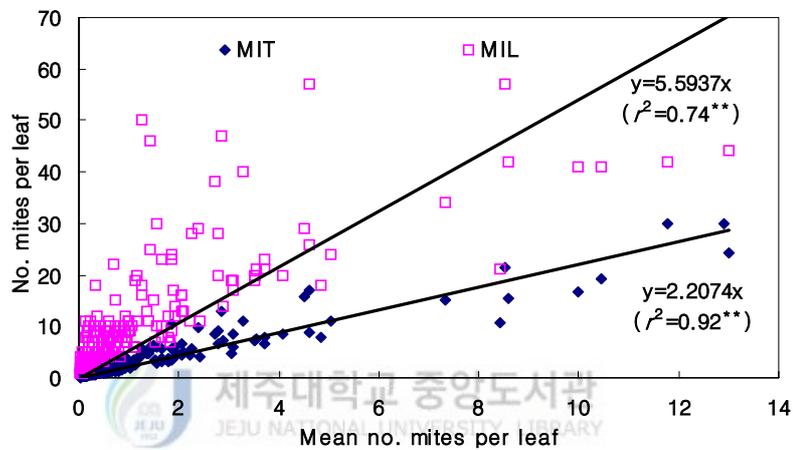


Fig. 4. Regression analysis of female adult mites number per leaf on maximum infested leaf and tree on mean densities per leaf.

잎당 평균밀도에 따른 잎의 최대밀도 및 최대발생나무의 잎당 평균밀도와의 관계는 Fig. 4와 같다. 잎당 평균밀도가 증가함에 따라 과수원 내에서의 최대 발생 잎과 최대 발생나무의 잎당 평균밀도 간에는 직선적인 관계가 있었으며, 잎당 평균밀도에 비해 최대 발생 잎은 5.6배, 최대발생나무의 잎당 평균밀도는 2.2배 더 높은 경향이였다. 최대 발생나무의 잎당 평균밀도가 최대 발생 잎의 밀도보다 r^2 값이 0.92로 더 높게 나타났다.

과수원의 잎당 평균밀도에 따른 일정 잎당 평균밀도이상으로 발생한 나무의 분포에 대해 회귀분석을 한 결과는 Table 8과 같다. 최대발생나무의 잎당 평균밀도가

0.5와 1.0, 2.0마리 이상의 나무비율과 과수원의 잎당 평균밀도와와의 회귀선의 형태는 부(-)의 곡선형태를 취했으나, 3.0과 4.0마리 이상의 나무비율에서는 로그 곡선형태를 보였다. 잎당 평균밀도가 0.5마리일 때 한 나무의 잎당 평균밀도가 0.5마리 이상, 1.0마리 이상, 2.0마리 이상인 나무의 비율은 각각 34.99과 16.83, 8.11%이었으며, 3마리 이상과 4마리 이상인 나무는 없었다. 한 나무의 잎당 평균밀도가 3.0과 4.0마리 이상인 나무가 나타나는 과수원의 잎당 평균밀도는 각각 1.03과 1.40마리였다. 또한, 과수원의 모든 나무의 잎당 밀도가 0.5마리 이상이 되는 잎당 평균밀도는 2.1마리였다. 이는 일본 시즈오카현에서 사용하고 있는 피해허용수준인 3.0마리일 때의 나무가 나타나는 잎당 평균밀도가 0.40~0.50마리의 2.5배를 상회하는 밀도로 일본에서 사용하고 있는 피해허용수준을 이용하는 경우에는 잎당 평균밀도가 1.0마리 내외가 되었다.

Table 8. Relationship of tree percentage infested with more than constant mean densities per leaf (y) with mean mite densities per leaf (x) on citrus groves.

Mean no. mites per leaf	n^a	Equation	r^2
0.5	177	$y = \frac{x}{0.4056x - 1.2260}$	0.93
1.0	123	$y = \frac{x}{2.9706}$	0.96
2.0	70	$y = \frac{x}{6.1639}$	0.92
3.0	68	$y = 0.3842 \ln(x)$	0.89
4.0	51	$y = 0.4175 \ln(x) - 0.1299$	0.86

^a Number of x and y pairs used to calculated the regression statistics.

나. 축차표본조사법

축차표본조사법은 조사한 곤충의 수를 누적하여 의사를 결정하는 방법으로 곽응애에 대한 표본조사법을 개발하기 위해서는 우선 경제적 피해수준과 방제밀도가 결정되어 있어야 한다. 현재 곽응애에 대한 경제적 피해수준과 방제밀도는 설정되어 있지 않기 때문에 일반적으로 사용되고 있는 방제밀도인 잎당 암컷 성충 밀도가 2~3마리를 이용하기로 한다. 본 연구에서 곽응애 밀도의 조사방법을 잎 채취조사와 육안조사를 이용하였는데, 잎 채취조사의 경우 성충뿐만 아니라 알과 약충에 대해서도 조사할 수 있는 장점이 있으나 많은 조사시간이 필요할 뿐만 아니라 조사포장에서 곧바로 의사결정을 하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 암컷 성충에 대한 육안조사에서 얻어진 TPL 상수를 이용한 표본조사법을 개발하였다.

1) 단순축차표본조사법

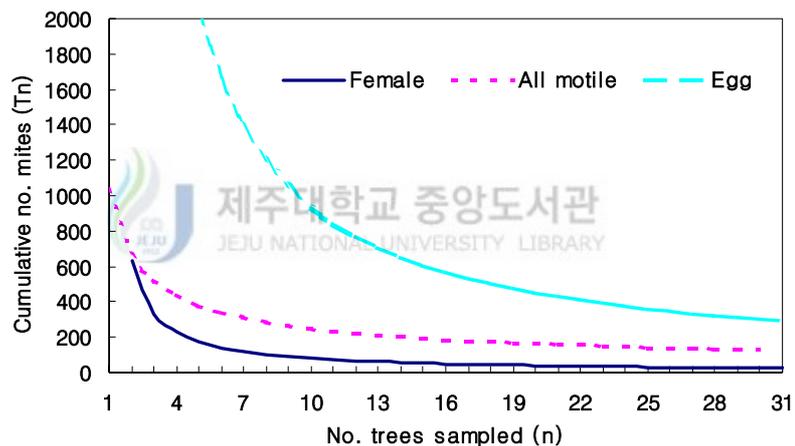


Fig. 5. Stop lines of inter-tree sequential sampling of female, all motile stages and egg stage with 0.25 precision level.

곽응애의 각 발육단계별 표본추출중지선은 잎 채취조사에서 얻어진 발육단계별 TPL 상수를 이용하여 구할 수 있으며, 감귤원에서 곽응애는 잎간 분포보다 나무간 분포가 집중도도 높을 뿐만 아니라 과수원 전체의 평균밀도를 추정할 때 나무간 분포를 이용하는 것이 알맞을 것으로 판단된다. 따라서 곽응애 암컷 성충과 약·성충, 알에 대해 나무간 TPL 상수를 이용한 표본추출중지선은 Fig. 5와 같다. 암컷 성충

의 잎당 평균밀도가 2마리일 때 필요한 나무수는 나무당 10엽을 조사하는 경우 6주였으며, 이 때의 약·성충과 알의 잎당 평균밀도는 각각 5.7마리와 23.2개였다. 표본추출중지선에 도달했을 때 누적마리수의 변화를 줄이기 위해 필요한 조사나무수는 암컷 성충 3주, 약·성충 2주, 알은 8주이었다.

굴응애 암컷 성충에 대해 정확도 수준 0.20과 0.25, 0.30에서 나무간 표본추출중지선은 Fig. 6과 같다. 정확도 수준이 높을수록 표본추출중지선에 도달하는데 필요한 누적응애수가 증가하였다. 조사하는 나무수를 증가시킬 때 누적응애수의 변화가 적어지는 시점의 나무수는 정확도 수준 0.20, 0.25와 0.30에서 각각 7과 3, 2주였다. 일반적으로 방제밀도로 사용하고 있는 잎당 2.0마리일 때 정확도 수준 0.20, 0.25와 0.30에서 필요한 조사주수는 각각 10, 6과 3주였다. 정확도가 0.25이고, 조사나무수를 10주와 15주로 고정시키는 경우 표본추출중지선에 도달했을 때의 잎당 평균밀도는 각각 0.73과 0.33마리였다.

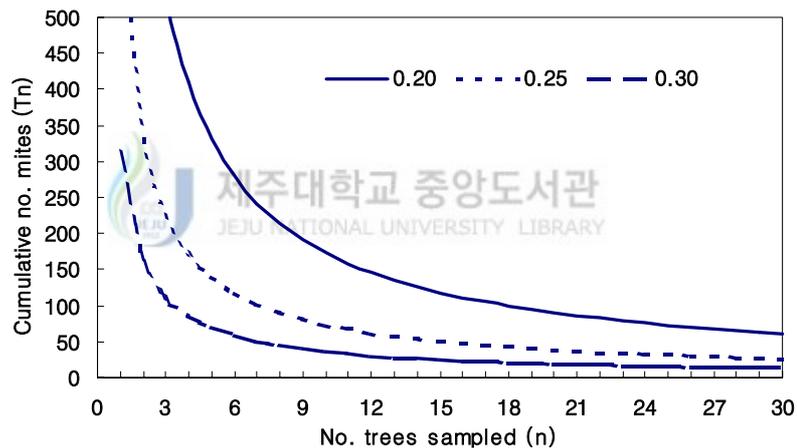


Fig. 6. Stop lines of inter-tree sequential sampling of female adults with 0.20, 0.25, and 0.30 precision levels.

굴응애 암컷 성충에 대해 나무당 10엽을 조사하는 경우 나무내 및 나무간 표본추출중지선은 Fig. 7과 같다. 요방제밀도가 잎당 평균 2.0마리일 때 표본추출중지선에 도달하는데 필요한 조사엽수와 나무수는 각각 28매와 6주였다. 나무내 TPL 상수를 이용했을 때 나무당 10엽을 조사하면 3주로 나무간 TPL 상수를 이용한 것의 50%

수준이었다. 두 수준에서 표본추출중지선에 도달했을 때의 잎당 평균밀도를 비교해보면 주당 10엽씩 3주를 조사한 경우 나무내와 나무간의 경우 잎당 평균밀도가 각각 1.9와 7.5마리였으며(나무간/나무내 비율=4.0), 10주를 조사하면 각각 0.3과 0.7마리(나무간/나무내 비율=2.2)로 조사표본수가 증가할수록 그 차이는 줄어드는 경향이 있었다. 따라서 이는 표본수가 작은 경우에는 곱응에 표본조사시에 표본단위를 나무당 조사엽수에 따른 필요한 조사나무수를 결정해야 한다는 것을 나타내고 있다.

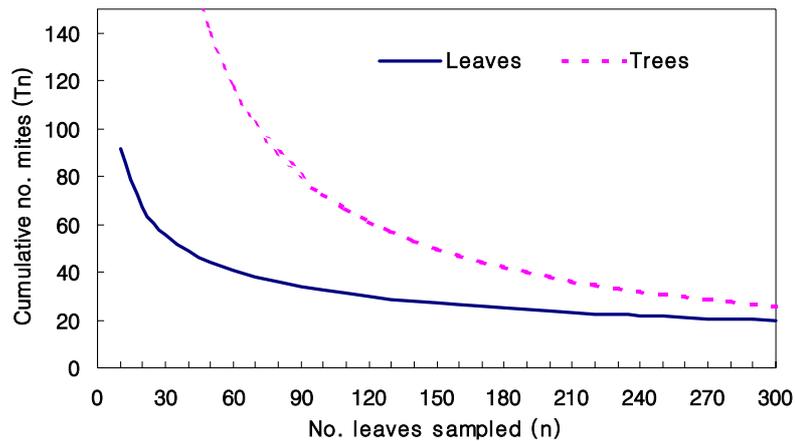


Fig. 7. Stop lines of inter- and intra-tree sequential sampling of female adult mites for 10 leaves sampled per tree with 0.25 precision level.

2) 계층축차표본조사법

성층을 이용한 나무내와 나무간 분산지수를 이용하면 표본크기 및 표본추출에 관한 분석이 가능하게 된다. 나무내와 나무간 곱응에 암컷 성층의 TPL은:

나무내

$$\text{잎 전체 } \ln S_W^2 = 1.06 + 1.31 \ln m$$

$$\text{잎 앞면 } \ln S_W^2 = 0.93 + 1.23 \ln m$$

나무간

$$\text{잎 전체 } \ln S_B^2 = 0.55 + 1.48 \ln m$$

$$\text{잎 앞면 } \ln S_B^2 = 0.61 + 1.47 \ln m$$

이다.

앞에서 얻어진 TPL 상수값을 이용하여 일정 조사엽수에 대한 필요한 조사나무수

의 수식은 일정 정확도 수준(d)과 평균밀도(m)를 이용하여 얻을 수 있다. 따라서 주어진 정확도 수준과 나무당 잎수(여기서는 10개)에 대한 필요나무수의 식은 :
 곁응애 성충

$$\text{잎 전체 } n_T = \frac{1}{(dm)^2} \left(\frac{n_L 1.74 m^{1.48} + 2.88 m^{1.31}}{n_L} \right)$$

$$\text{잎 앞면 } n_T = \frac{1}{(dm)^2} \left(\frac{n_L 1.84 m^{1.47} + 2.40 m^{1.22}}{n_L} \right)$$

이다.

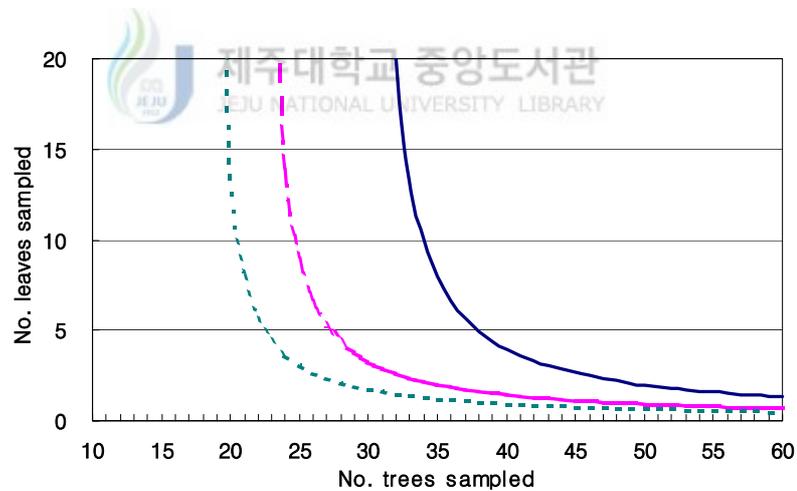
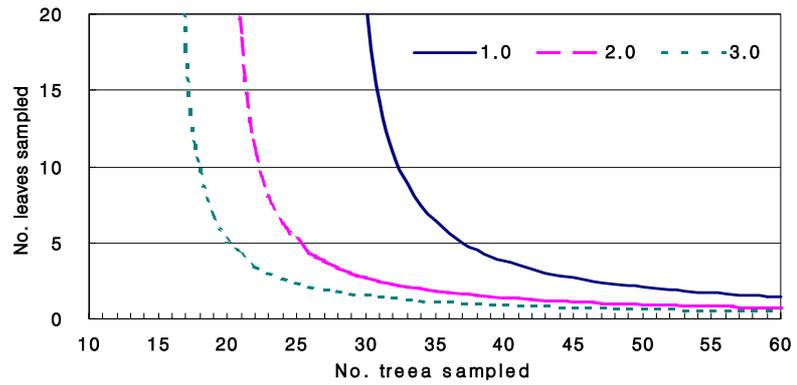


Fig. 8. Fixed size sampling plans for female adult mites by visual inspection on both-side of leaf (Up) and upper side of leaf (Down) for 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf thresholds, with 0.25 precision.

Fig. 8은 정확도 0.25, 잎당 굴응에 평균밀도가 1.0과 2.0, 3.0마리일 때 조사나무당 필요한 조사엽수를 나타낸 것이다. 잎당 1.0과 2.0, 3.0마리의 성충밀도에서 나무당 조사엽수를 10매로 하면 필요한 나무수는 잎 전체를 조사할 때에는 각각 33, 23과 18주였으며, 잎 앞면만 조사하는 경우에는 각각 34, 25와 21주였다. 잎 앞면만을 조사하는 경우 잎 전체를 조사하는 것보다 필요한 나무수가 1~3주가 더 많은 것으로 나타났다. 나무당 조사엽수를 10매 이상으로 늘리더라도 조사해야하는 나무수는 감소하지 않았으나, 그 이하에서는 조사해야하는 나무수가 크게 증가하는 경향이 있었다. 나무당 조사엽수를 5매로 했을 때 필요한 조사나무수는 평균밀도에 따라 각각 37, 25와 21주였는데, 이는 10매를 조사했을 때보다 각각 4, 2, 3주가 더 많았다. 33주를 조사하는 경우 잎당 평균밀도 1.0과 2.0, 3.0에서 잎 전체를 조사하는 경우 필요한 조사잎수는 각각 9와 2, 1매였고, 잎 앞면을 조사하는 경우에는 각각 13과 2, 1매였다. 즉, 잎당 평균밀도가 높아질수록 조사나무당 필요한 조사엽수는 감소하였으며, 조사단위가 잎 전체와 앞면일 때 필요한 조사엽수에 차이가 줄어드는 경향이 있었다.

잎당 평균밀도가 2.0마리일 때 정확도 수준에 따른 조사엽수와 조사나무간의 관계는 Fig. 9와 같다. 정확도가 높을수록 조사나무당 필요한 조사엽수가 증가하였으며, 나무당 조사엽수가 10매일 때 정확도가 0.20, 0.25와 0.30에서 필요한 조사주수는 잎 전체 조사시에는 각각 36과 23, 15주, 잎 앞면 조사시에는 각각 39와 25, 18주였다. 즉 잎 앞면만 조사하는 경우 정확도 수준에 따라 2~3주가 더 필요한 것으로 나타났다. 표본조사의 효율성을 고려하면 정확도가 해충방제에 일반적으로 사용되고 있는 0.25(Southwood, 1978)보다 0.30을 이용하는 것이 알맞을 것으로 판단되었다.

계층축차표본조사법은 조사할 나무수와 나무당 조사엽수의 가능한 조합을 제공해 준다. Nyrop *et. al.*(1990)은 나무와 잎수의 최적 조합에 따라서 표본조사 시간을 결정했는데, 나무수가 증가함에 따라 나무당 조사되는 잎수는 감소한다. 이들간의 적절한 조합은 조사에 소요되는 총허용시간과 나무와 포장의 상황에 따라 달라진다. 해충의 잎당 평균밀도가 높은 경우 나무내에서 해충 밀도를 조사하는데 소요되는 시간이 나무간 이동에 필요한 것보다 더 많기 때문에 나무당 필요한 조사엽수가 크

게 줄어드는 한 조사하는 나무수를 증가시키는 것이 바람직하다. 즉, 나무수는 필요한 조사엽수의 감소가 중지되는 지점에서 결정하는 것이 좋다(Agrov *et. al.*, 1999). 그러나 감귤원에서 귤응애에 대한 방제밀도가 2~3마리로 낮은 경우에는 한 나무에서 조사엽수를 증가시켜 조사하는 시간보다 나무간 이동시간이 더 많이 소요되는 경향이였다. 따라서 필요한 총주수가 적은 잎 전체를 대상으로 조사하는 것이 좋으며, 나무당 잎수는 조사나무수의 증가가 정지하는 시점인 나무당 10매를 조사하는 것이 알맞은 것으로 판단되었다.

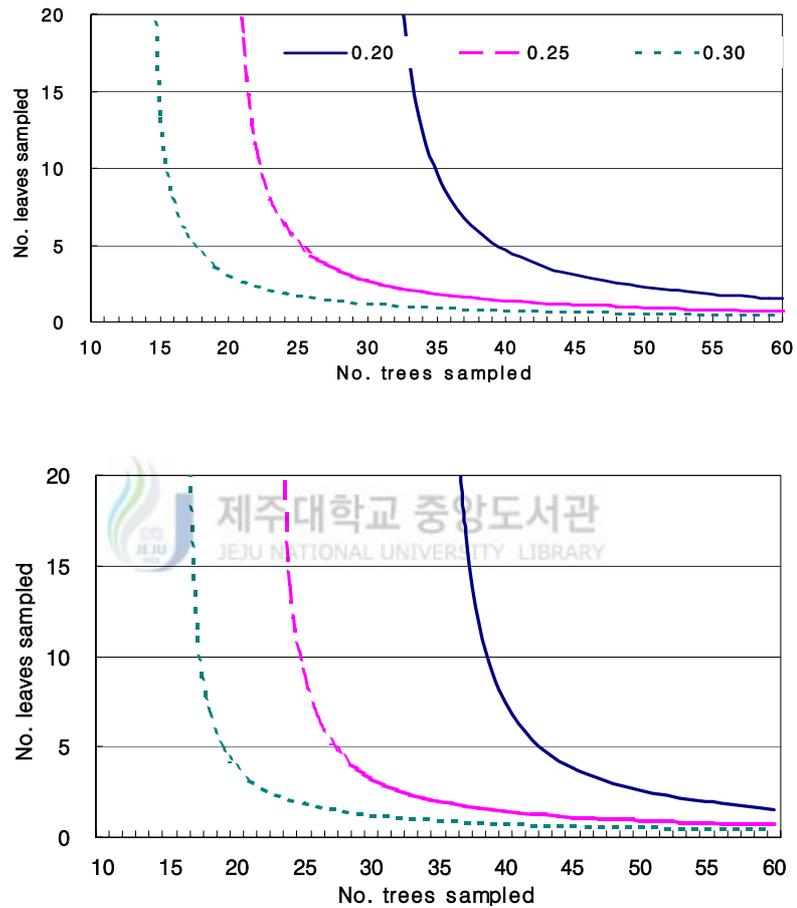


Fig. 9. Fixed size sampling plans for female adult mites sampled by visual inspection on both-side of leaf (Up) and upper side of leaf (Down) for threshold of 2.0 mite per leaf, with 0.20, 0.25 and 0.30 precision.

표본조사법을 개발하는 목적은 추정평균의 표본분산(S_m^2)을 최소화하면서 고정표본크기조사시에 필요한 총조사시간과 같거나 적은 시간이 드는 조사엽수와 나무수를 찾는 것이다. 따라서 나무당 같은 엽수를 조사할 때 필요한 조사주수가 적은 일 전체 조사에 대해 계층축차표본조사법을 개발하였다.

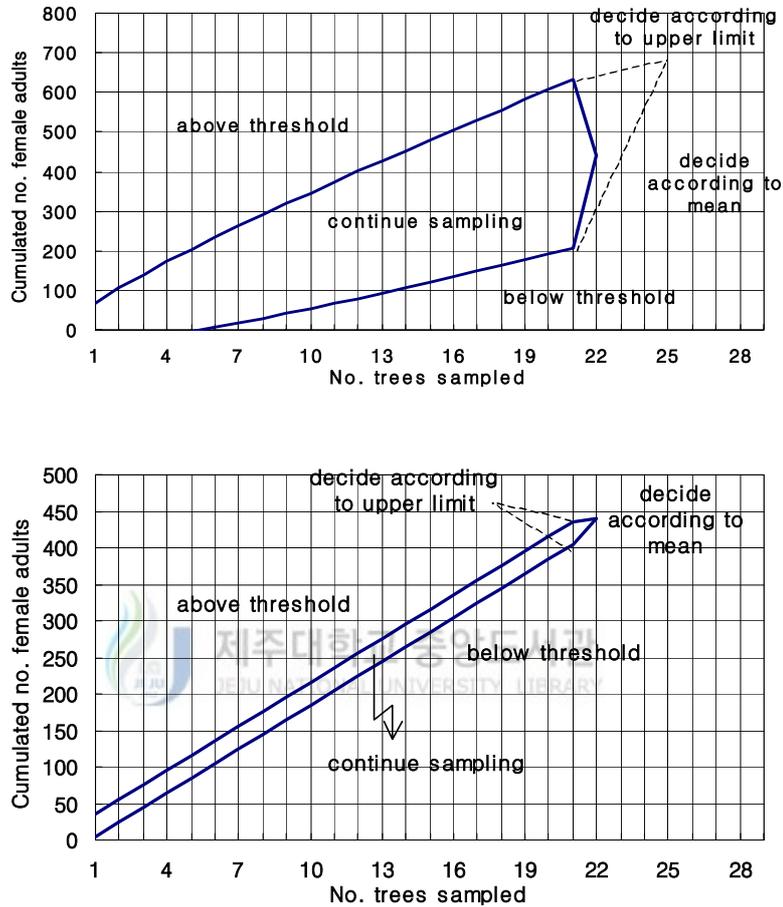


Fig. 10. Decision making areas in citrus red mite adults monitoring for 2.0 threshold with 0.25 precision by point estimation (Up) and interval estimation (Down).

Snedecor and Cochran (1967)은 평균에 대한 표준오차를 추정할 때 모평균의 점 추정 방법을 이용하였는데, 본 연구에서는 점추정 뿐만 아니라 구간추정방법을 이용하여 의사결정선을 구하고 이들을 비교하였다. 방제밀도(m_T) 2.0마리, 정확도 수

준 0.25에서의 의사결정선은 Fig. 10과 같다. 나무당 누적 곽응애수가 상한선보다 많은 경우에는 조사를 중지하고 ‘방제’로 의사결정을 하고, 하한선보다 낮은 경우에는 조사를 중지하지만 ‘무방제’로 의사결정을 하게 된다. 그러나 두 직선 사이에 놓여 있을 경우에는 최대조사나무수인 22주가 될 때까지 조사를 계속해야 하며, 최대조사나무수에 도달한 경우에는 표본평균의 임계값을 이용하여 의사를 결정할 수 있다. 점추정방법을 이용해 의사결정선을 구한 결과 상한과 하한의 폭이 매우 넓었으며, 그 폭은 조사나무수가 증가할수록 더 넓어지는 경향이였다. 그러나 구간추정방법을 이용했을 때 상한과 하한의 폭이 매우 작아졌을 뿐만 아니라 상한과 하한선이 평행한 직선으로 나타났다. 점추정에 의할 경우 ‘무방제’에 대한 의사결정은 적어도 6주를 조사해야 가능했으나, 구간추정 방법에서는 1주만 조사해도 가능하였다. 10주를 조사한 후 의사결정을 하려면 점추정의 상한과 하한은 각각 347마리(일당 평균 3.47마리)와 53마리(일당 평균 0.53마리)였으나, 구간추정의 경우에는 각각 215마리(일당 평균 2.15마리)와 185마리(일당 평균 1.85마리)였다.

이에 대해 TPL을 추정하는데 이용하지 않은 자료중 표본크기(나무수)가 24개인 회천지역의 자료에 대해 simulation을 통해 검증한 결과는 Table 9와 같다. 2000년 3개, 2001년 6개의 자료에 대해 100회의 simulation을 실시하였으며, 이들의 일당 평균밀도는 0.17~4.05마리였다. 점추정방법에 의한 의사결정의 경우 평균표본크기는 6.04~22주였으며, 구간추정방법에 의한 경우 평균표본크기는 1.19~4.19주였다. 특히, 점추정방법의 경우 요방제수준(일당 평균밀도=2.0마리)에 가까울 경우 최대조사주수인 22주를 조사해야 의사결정이 가능한 것으로 나타났으나, 구간추정방법을 이용한 경우에는 2.49~4.19주만 조사하면 의사결정이 가능했다. 24주의 표본조사에 대한 일당 평균밀도와 축차표본조사에 의한 의사결정결과를 비교했을 때 요방제수준에 가까울수록 표본크기가 증가하는 경향이였다. 점추정방법에 의한 의사결정이 일당 평균밀도에 의한 표본조사에서의 결정과 비교해보면 요방제수준인 2000년 8월 29일 조사와 2001년 8월 17일 조사에서만 잘못된 의사결정이 이루어졌으나 구간추정에서는 일당 평균밀도가 3.5마리(2000년 6월 25일)일 때에도 10%의 오류가 발생하였다. 그러나 표본조사의 효율성을 고려한다면 구간추정에 의한 축차표본조사방법이 더 경제적인 것으로 판단된다.

Table 9. Summary of simulations of sequential cluster sampling plan for citrus red mite adult by point estimation (PE) and interval estimation (IE) for Hoicheon area data sets.

Date (Year)	Mean	Sampling method	% Simulations resulting in a decision		Mean number of trees sampled	Median number of trees sampled
			'Spray'	'Don't spray'		
25 Jul. (2000)	3.50	PE	100	0	8.03	8(1~17)
		IE	90	10	1.56	1(1~7)
29 Aug.	2.07	PE	94	6	22.00	22(22)
		IE	55	45	4.19	3(1~16)
21 Sept.	2.26	PE	100	0	22.00	22(22)
		IE	60	40	2.49	2(1~9)
23 Apr. (2001)	1.42	PE	0	100	21.87	22(15~22)
		IE	15	85	1.84	1(1~7)
12 Jun.	0.17	PE	0	100	7.00	7(6~8)
		IE	0	100	1.19	1(1~2)
8 Jul.	0.60	PE	0	100	11.52	12(8~15)
		IE	0	100	1.45	1(1~2)
18 Jul.	0.91	PE	0	100	18.60	19(12~22)
		IE	0	100	1.87	2(1~4)
17 Aug	2.00	PE	53	47	22.00	22(22)
		IE	52	48	3.77	3(1~11)
12 Sept.	4.05	PE	100	0	6.04	6(1~13)
		IE	100	0	1.62	1(1~7)

따라서 본 연구에서 계층축차표본조사법을 점추정방법이 아니라 구간추정방법을 이용하기로 한다. 실지 포장에서는 조건표를 이용하는 것이 더 효율적이며, 나무당 10매의 잎을 조사할 때 잎당 평균밀도 1.0과 2.0, 3.0에서 의사결정 조건표는 Table 10과 같다. 정확도 수준 0.25에서 요방제밀도를 잎당 성충밀도 1.0, 2.0과 3.0마리에 대한 최대조사나무수는 각각 32, 22와 18주였으며, 이 때의 임계값은 신뢰상한값을 이용하는 경우에는 각각 452, 622와 763마리, 신뢰하한값은 각각 188, 259와 318마리, 평균값은 각각 320, 440과 540마리였으며, 본 조건표에는 평균값을 이용하였다. 상한과 하한 사이의 폭은 요방제수준이 높을수록 넓어지는 경향이었는데, 이는 Argov *et. al.* (1999)이 귤가루이에 대한 축차표본조사 결과와 같은 경향이였다.

Table 10. Sequential cluster sampling plan for female adults of citrus red mite for decision making at action thresholds (m_T) of 1.0, 2.0 and 3.0 mites, with 0.25 precision level

No. trees	Total number of female adults for decision making					
	$m_T=1.0$		2.0		3.0	
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit
1	1	19	5	35	10	50
2	11	29	25	55	40	80
3	21	39	45	75	70	110
4	31	49	65	95	100	140
5	41	59	85	115	130	170
6	51	69	105	135	160	200
7	61	79	125	155	190	230
8	71	89	145	175	220	260
9	81	99	165	195	250	290
10	91	109	185	215	280	320
11	101	119	205	235	310	350
12	111	129	225	255	340	380
13	121	139	245	275	370	410
14	131	149	265	295	400	440
15	141	159	285	315	430	470
16	151	169	305	335	460	500
17	161	179	325	355	490	530
18	171	189	345	375		540
19	181	199	365	395		
20	191	209	385	415		
21	201	219	405	435		
22	211	229		440		
23	221	239				
24	231	249				
25	241	259				
26	251	269				
27	261	279				
28	271	289				
29	281	299				
30	291	309				
31	301	319				
32		320				

2. Kono-Sugino의 경험 이항 모델

축차표본조사법의 경우 잎마다 곱응애 숫자를 모두 계수하면서 누적해야하기 때문에 밀도가 높은 경우에는 이를 모두 조사하는데 많은 시간이 소요된다. 이를 보완하기 위해 일정 마리수 이상의 곱응애가 존재하는 표본수를 조사하여 밀도를 추정하는 이항분포조사법을 이용한다. 이항표본조사는 해충수가 “0”인 표본의 비율과 개체군 평균밀도와의 관계를 통계적으로 추정할 식이 필요하며, 이들 관계에 대한 여러 가지 대수학 형태가 있다(Wilson and Room, 1983; Kuno, 1986). 그 중 한가지는 해충의 공간분포에 관한 추정, 즉 상수 “ k ”를 이용한 부(-)의 이항분포이며(Wilson and Room, 1983), 또 다른 하나는 경험분포에 의한 것이 있다(Binns and Bostanian, 1990). 이 경험모델은 각 조사자료에 대해 표본단위(잎)에 존재하는 해충수에 따른 비율과 평균밀도와의 관계를 회귀분석하는 것으로 이 과정에서 평균에 대한 추정분산($\text{var}(m)$)을 계산할 수 있는 장점이 있는데(Nyrop *et. al.*, 1989), 이 분산의 계산은 개체군 추정에서 이항표본조사의 정확도 평가(Nyrop *et. al.*, 1989; Binns and Bostanian, 1988)와 표본크기의 결정(Lysyk and Sanders, 1987), 병해충 종합관리에서 의사결정에 대한 작용특성의 평가에 필요하다(Binns and Bostanian, 1990). 본 연구에서 이용한 자료는 300개였고 곱응애 밀도는 잎당 0.01~12.99마리였으며, P_T 값이 “0”인 것을 제외하고 분석하였다.

Table 11. Parameters of an empirical binomial model $\ln(m) = \alpha + \beta \ln[-\ln(1 - P_T)]$ of mean mite densities per leaf and the proportion of leaves infested with at least T mites

T	α	β	N	r^2	P_m	S_p^2	MSE
1	0.6534	1.1734	289	0.96	-1.3426	0.05885	0.06790
2	1.1383	0.8372	271	0.96	-2.2432	0.03149	0.06002
3	-0.0471	0.1657	248	0.25	-3.1044	0.08026	0.91283

$\ln(m)$ 과 $\ln(-\ln(1 - P_T))$ 의 회귀식에서 구한 상수값을 기초로 한 발생엽율과 평균밀도와의 함수식은 Table 11과 같다. r^2 의 값은 $T=1$ 과 2에서 0.96이었으며, T 값이 그보다 크면 급격히 낮아지는 경향을 보였다. 회귀식의 안정성을 나타내는 MSE 의 값은 $T=2$ 에서 가장 적었기 때문에 $T=2$ 가 이항표본조사에 가장 알맞은 것으로 판단

되었다. 이항표본조사 모델이 무한대로 접근할 때 추정할 수 있는 평균밀도의 한계가 중요한데(Naranjo *et. al.*, 1996), P_T 값이 0.01~0.99일 때 추정할 수 있는 평균밀도는 $T=1$ 과 2에서 각각 0.01~11.5마리와 0.07~11.2마리로 비슷하였다.

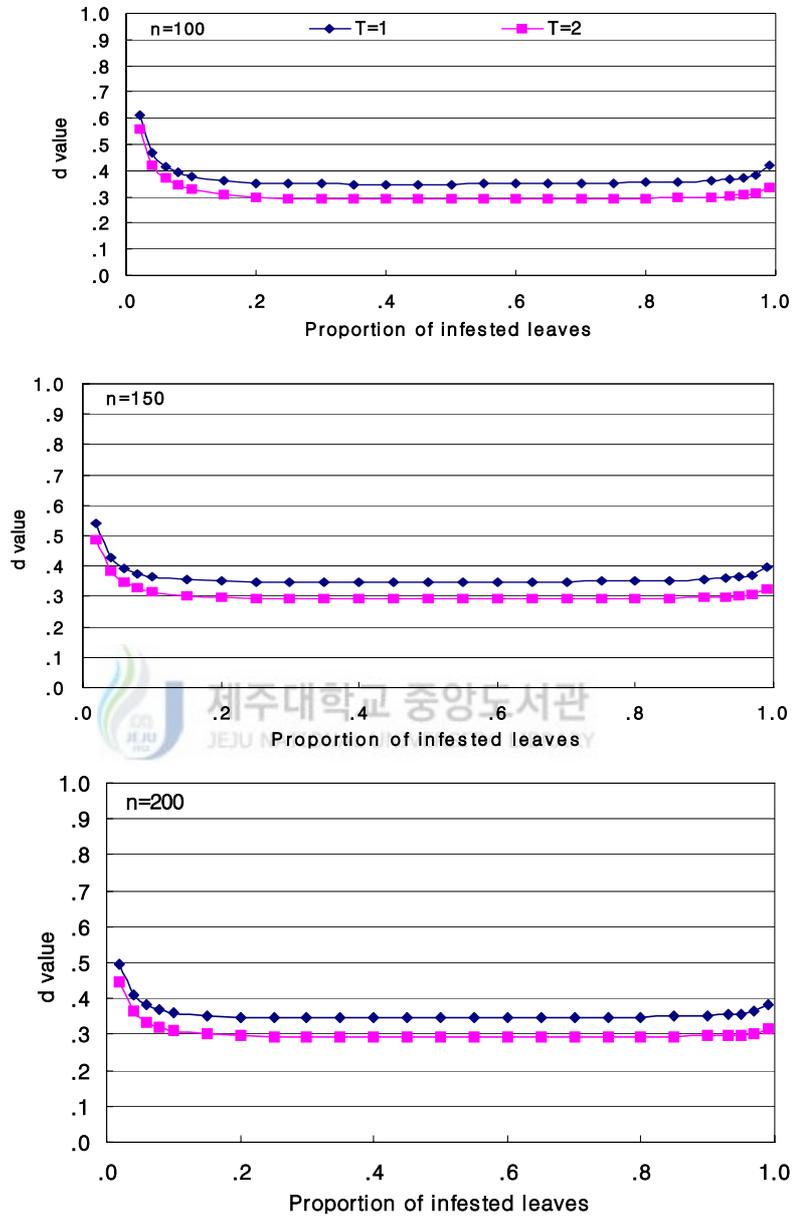


Fig. 11. Sampling precision (d) expressed as a function of proportion of infested leaves with the sample size of 100, 150 and 200.

추정평균의 가변성과 편이의 영향을 줄이기 위해서는 tally threshold를 적합하게 선택해야한다(Nyrop and Binns, 1991; Cho *et. al.*, 2000). 평균밀도를 추정할 때 표본크기와 tally threshold의 영향을 발생엽율과 조사된 표본단위수의 함수로 정확도를 결정한 것은 Fig. 11과 같다. 표본크기를 100과 150, 200으로 했을 때 $T=2$ 에서의 정확도 범위는 각각 0.290~0.558, 0.291~0.486과 0.291~0.446으로 표본크기가 커질수록 높은 밀도에서의 정확도가 약간 높아지는 경향을 보이기는 했으나 표본크기가 증가하더라도 정확도에 미치는 영향은 적었다. 이와 같은 결과는 감자에서 오이 총채벌레(Cho *et. al.*, 2000), 토마토에서 *Frankliniela* spp. (Salguero-Navas *et. al.*, 1994)와 목화에서 담배가루이(Naranjo *et. al.*, 1994)의 이항표본조사법에서도 비슷한 경향이었는데, 이는 표본크기가 분산추정에서 상대적으로 그 비중이 적기 때문이다. 표본크기가 200일 때 $T=1$ 과 2에서 d 값의 범위는 각각 0.345~0.497과 0.291~0.446 이었으며, 표본크기에 관계없이 T 값에 따라 정확도가 달라졌다. 일반적으로 해충관리에 이용되는 d 값은 0.25(Southwood, 1978)이나 이를 충족시키지는 못했다. 그러나 $T=2$ 일 때 표본크기에 관계없이 발생엽율 0.2~0.9에서 정확도가 0.3보다 높게 나타났으며, 이 때의 일당 평균밀도의 범위는 0.9~6.3마리였다. 이는 평균밀도와 발생엽율 관계식의 안정성에 관여하는 MSE 가 $T=1$ 보다 2일 때 더 낮은 것에도 관계가 된다(Jones, 1994). 본 연구에서 정확하게 P_T 를 추정하는데 필요한 표본수는 낮은 밀도에서도 정확도가 높으면서 표본수가 적은 100이 적당할 것으로 판단되었다.

발생엽율에 대한 최소표본크기에 따른 작용특성(OC)과 평균표본수(ASN)의 관계는 Fig. 12와 같다. OC 곡선에서 1.0은 무방제로, 0.0은 방제로 의사결정을 오류없이 내리게 된다. OC 곡선에서 최소표본의 크기가 증가할수록 P 값이 1.0 또는 0.0으로 의사를 결정할 수 있는 범위가 증가하는 경향을 보였다. 최소 표본크기가 10일 때 올바른 의사를 결정할 수 있는 발생엽율(일당 평균밀도)의 범위는 $P_T \geq 0.2(0.89)$ 또는 $P_T \geq 0.6(2.90)$, 최소표본크기 30일 때 $P_T \geq 0.27(1.19)$ 또는 $P_T \geq 0.58(2.77)$, 최소 표본크기 50일 때 $P_T \geq 0.32(1.41)$ 또는 $P_T \geq 0.55(2.59)$ 이었으며, 최소표본크기가 70일 때는 $P_T \geq 0.35(1.54)$ 또는 $P_T \geq 0.51(2.35)$ 이었다. 발생엽율이 방제밀도 수준(일당 평균밀도=2.0, 발생엽율=0.44)에 가까울수록 잘못된 의사 결정을 내릴 확률이 높아지는 것으로 나타났으며, 요방제수준인 0.44 부근에서의 P 값은 표본크기에 관계없이 0.5에 가까웠다. 즉, 최소표본크기가 10일 때는 P 값이 1 또는 0이 되는 일당 평

균밀도가 0.89마리 이하이거나 2.90마리 이상이었으나, 최소표본크기가 70일 때는 1.54마리 이하이거나 2.35마리 이상으로 의사결정에서 오류가 발생할 수 있는 일당 평균밀도의 범위가 좁아졌다. ASN 곡선은 최소표본크기가 증가할수록 표본수가 증가하는 경향이었으며, 요방제밀도에서 최대였고, 그 밀도에서 멀어질수록 표본수가 줄어드는 경향을 보였다. 최소표본크기가 10일 때 최대표본수가 15였지만, 나머지 표본크기에서는 모두 최소표본크기보다 3이 큰 것으로 나타났다. 따라서 표본조사의 효율성을 고려해보면 최소표본크기는 10보다 커야 할 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 사과응애(Nyrop *et. al.*, 1989)와 사과굴나방류 (Nyrop *et. al.*, 1990)와 유사한 경

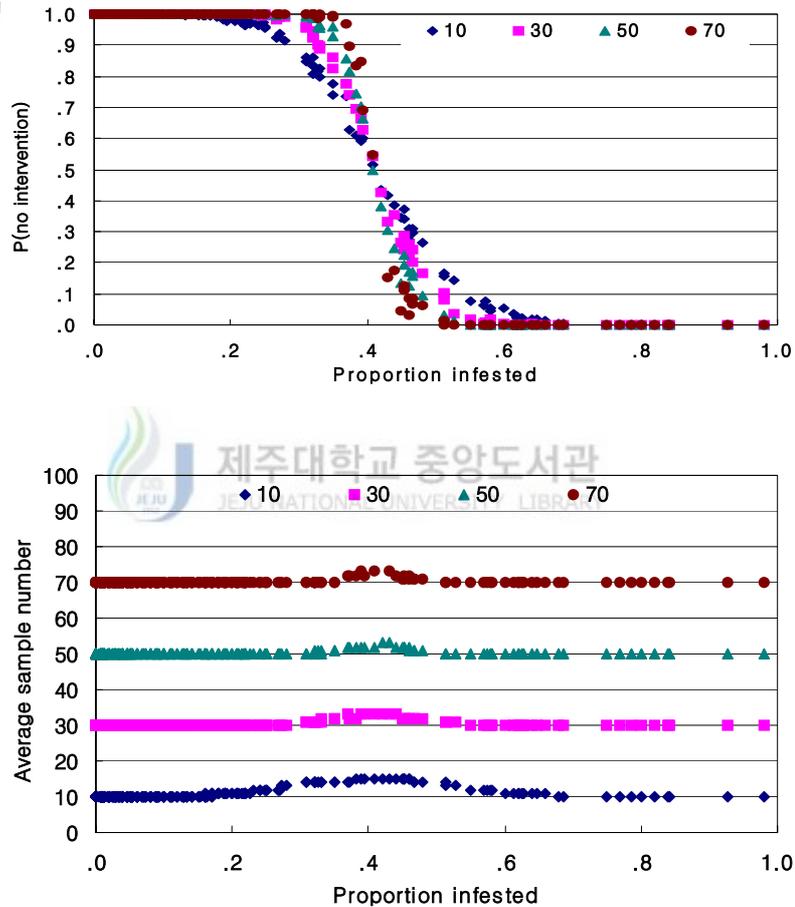


Fig. 12. Operating characteristic (Up) and average sample number (Down) curves for binomial sequential probability ratio test with upper bound = 0.615, lower bound = 0.226, α and β error = 0.10 at different minimum sample size of 10, 30, 50 and 70.

Table 12. The stop limits calculated using 95% confidence intervals for decision-making of citrus red mite based on action thresholds of 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf

No. trees sampled	Action thresholds(m_T) ^a					
	$m_T=1.0$		$m_T=2.0$		$m_T=3.0$	
	LL ^b	UL ^c	LL	UL	LL	UL
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	4	14	8	17
3	2	12	8	19	13	24
4	3	15	11	24	18	31
5	5	18	15	30	23	38
6	7	20	22	35	29	44
7	8	23	26	40	35	51
8	10	26	30	45	40	58
9	12	29	34	50	46	65
10	14	31	38	55	51	71
11	16	34	42	60	57	78
12	18	37	46	64	63	85
13	20	39	50	69	69	91
14	21	42	54	74	74	97
15	23	44	58	79	80	104
16	25	47	62	84	86	111
17	27	50	66	89	92	117
18	29	52	71	93	97	124
19	31	55	75	97	103	130
20	33	57	79	103	109	137
Stop sampling						

^a Total number of leaf infested with at least 1 mite.

^{b, c} Lower limit and Upper limit, respectively.

요방제수준(action threshold)을 잎당 1.0과 2.0, 3.0마리로 했을 때 95% 신뢰구간을 이용하여 계산한 표본조사의 의사결정에 대한 이항표본조사 조건표는 Table 12와 같다. 잎당 굴응애 평균밀도가 2.0마리일 때 2마리 이상의 응애가 존재하는 잎의 비율은 0.44였으며, 이 값을 이용하여 상한(UL)과 하한(LL) 값을 구했다. 의사결정은 주당 10엽을 조사하는 경우 1주만 조사하더라도 의사결정이 가능하였으나, 확률변수의 분포가 근사적으로 표준정규분포를 따르기 위해서는 $np > 5$ 이고 $n(1-p) > 5$ 이어야 하는데, 1주를 조사했을 때는 이 조건을 충족시키지 못해 제외하였다. 조사한 나무수까지 2개 이상의 굴응애가 존재하는 잎의 누적수가 UL 이상이면 조사를 중

지하고 “방제”로, 그 누적수가 LL 이하일 때도 조사를 중지하고 “무방제”로 의사결정을 하게 된다. 그러나 누적수가 UL과 LL 사이에 있을 때는 조사를 계속 실시하게 된다. 예를 들면, 10주를 조사했을 때 2마리 이상의 꿀응애가 존재하는 누적값수가 55개 이상이면 조사를 중지하고 “방제”로, 38개 이하이면 역시 조사를 중지하고 “무방제”로 의사결정을 하게 된다.

Table 13. Classification of citrus red mite population levels by binomial sequential probability ratio test based on action thresholds of 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf

No. trees sampled	Action thresholds(m_T) ^a					
	$m_T=1.0$		$m_T=2.0$		$m_T=3.0$	
	LL ^b	UL ^c	LL	UL	LL	UL
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	6	10	10	14
3	3	5	11	14	16	20
4	5	7	15	18	22	26
5	6	8	19	22	28	32
6	8	10	23	26	34	38
7	9	11	27	31	40	44
8	11	13	31	35	46	50
9	12	14	35	39	51	56
10	14	16	39	43	57	62
11	15	17	43	47	63	68
12	17	19	48	51	69	74
13	18	20	52	55	75	80
14	20	22	56	59	81	86
15	21	23	60	63	87	92
16	22	25	64	68	93	98
17	24	26	68	72	99	104
18	25	28	72	76	105	110
19	27	29	76	80	111	116
20	28	30	80	84	117	122

Stop sampling

a, b, c See Table 12.

Wald의 축차확률검정(Sequential Probability Ratio Test, SPRT)을 이용하면 의사결정을 위한 상한과 하한선의 기울기와 절편값을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 상한과 하한의 조건표를 만들 수 있다(Table 13). 조사중지를 판단하기 위해 필요한 나무수는 요방제수준 1.0에서는 3주, 2.0과 3.0에서는 2주를 조사하면 가능했으

며, 상한과 하한의 폭이 95% 신뢰구간을 이용한 경우보다 적었다. 95% 신뢰구간을 이용한 경우 조사나무수가 증가할수록 상한과 하한의 폭이 늘어나는 경향이었으나, SPRT를 이용하면 상한선과 하한선이 평행이다. 10주를 조사했을 때 95% 신뢰구간을 이용한 경우 상한과 하한의 누적발생일수의 차이가 17개였으나, SPRT에서는 4개로 그 폭이 매우 적었다.

95% 신뢰한계(95% CI)와 SPRT를 이용한 이항표본조사법을 회천지역의 자료에 대해 100회 simulation을 한 결과는 Table 14와 같다. 이용한 자료의 일당 평균밀도 범위는 0.60~4.05마리였다. 조사에 필요한 나무수는 95% CI는 2.33~4.36주, SPRT는 2.00~2.46주로 SPRT의 평균조사나무수가 적었으며, 그 변화의 폭도 좁았다. 95% CI의 경우 일당 평균밀도가 2.07 (2000년 8월 29일)과 2.26마리(2000년 9월 21일)에서 20주까지 조사하더라도 의사결정을 할 수 있는 비율이 각각 19와 45%이었으나, SPRT는 모든 밀도 범위에서 100% 의사결정을 할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 잘못된 의사결정을 내리는 비율은 SPRT가 95% CI보다 높았다.

Table 14. Summary of 100 simulations of empirical binomial sampling models by 95% confidence intervals (CI) and Wald's sequential probability ratio test (SPRT) for data sets of Hoicheon area

Date (Year)	Mean density	Method	% decision-making	% incorrect classifying	Mean no. trees sampled
25 Jul. (2000)	3.50	95% CI	100	5	4.04(12) ^a
		SPRT	100	9	2.25(5)
29 Aug.	2.07	95% CI	19	-	4.47(11)
		SPRT	100	58	2.49(5)
21 Sept.	2.26	95% CI	45	-	4.36(12)
		SPRT	100	51	2.46(6)
23 Apr. (2001)	1.42	95% CI	100	0	3.88(13)
		SPRT	100	12	2.22(4)
8 Jul.	0.60	95% CI	100	0	2.38(6)
		SPRT	100	0	2.04(3)
18 Jul.	0.91	95% CI	100	0	3.69(12)
		SPRT	100	7	2.34(6)
12 Sept.	4.05	95% CI	100	0	2.33(6)
		SPRT	100	0	2.00(2)

^a Maximum number of trees sampled

3. 부(-)의 이항표본조사 모델

부(-)의 이항표본조사 모델(NBS)은 일반적으로 해충 개체군의 집중분포를 설명하는데 이용되는 이론함수이다(Bliss and Fisher, 1953). 이항표본조사 방법은 해충수를 직접 계수하는 방법에 비해 표본조사 시간을 획기적으로 줄일 수 있기 때문에 해충관리를 목적으로 하는 경우 매우 실용적이다. 그러나 $P(0)$ 의 이항조사방법은 높은 밀도에서 개체군 밀도를 정확하게 예측할 수 없는 단점이 있다. 이를 해결하는 방법으로 threshold를 증가시키게 되면 높은 밀도에서도 조사의 정확도를 높일 수 있다(Gerrard and Chiang, 1970; Binns and Bostanian, 1990). 우선 귤응애의 분포가 부(-)의 이항분포(NBD)를 따르는지를 알아야 하며, 이는 NBD 상수 k 값을 추정하고 이를 바탕으로 검정할 수 있다.

가. 부(-)의 이항분포 상수 k

NBD k 값의 범위는 0.0081~11이었다(k 의 평균=0.6965, 표준편차=1.0251) (Fig. 13). 일반화한 $k(k_c)$ 값을 구하기 위하여 $X'-Y'$ 를 그래프로 나타내었는데, 그 중 2개의 자료가 회귀의 주요 경향에서 벗어났다.

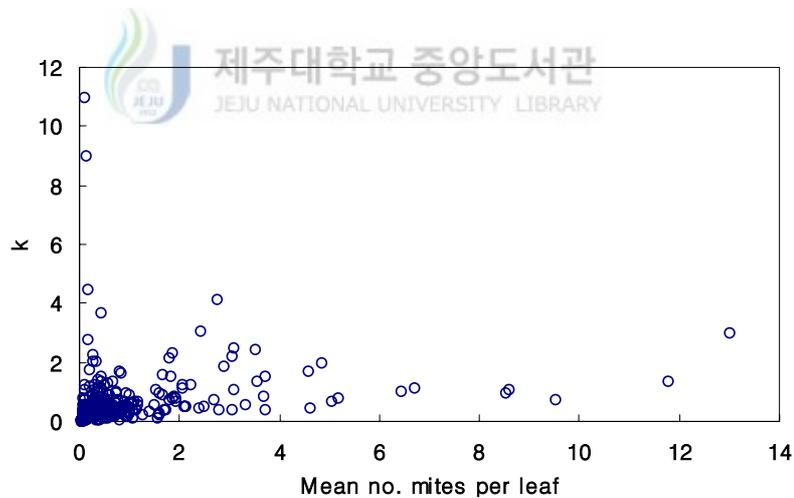


Fig. 13. Negative binomial k -values associated with observed mean densities of citrus red mite per leaf.

이 자료의 평균밀도와 k 값은 각각 9.5와 0.712, 13.0과 2.988이었으며, 이들 자료는

k_c 를 구하는 것에서는 제외하였다. 집중분포 정도($1/k$)가 일당 평균밀도(m)가 0.5마리 이하일 때 평균값은 4.04로 매우 높게 나타났으나, $0.5 < m \leq 1.0$ 은 2.82, $1.0 < m \leq 3.0$ 은 2.03, $m > 3.0$ 은 1.09로 일당 평균밀도가 증가할수록 집중도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 굴녹응애(Hall *et. al.*, 1997)에 대한 조사와 같은 경향이였다.

k_c 를 결정하는데 이용한 279개의 자료 중 굴응애의 일당 평균밀도 범위는 0.02~11.78마리였다(일당 평균밀도는 0.92, 표준편차는 1.41). 추정된 개별 k 값의 범위는 0.0081~11.0(k 평균=0.6882, 표준편차=1.0195)이었으며, k_c 의 값은 1.2874이었다(d.f.=1, 278, $F=2382.02$, $P<0.0001$, $r^2=0.8951$) (Fig. 14).

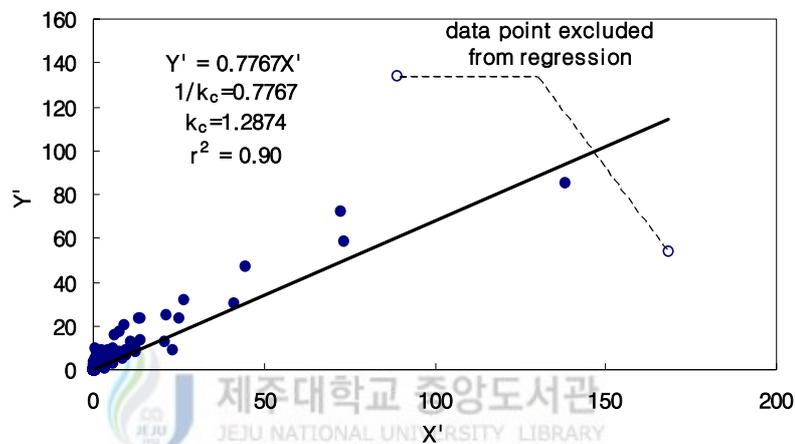


Fig. 14. Regression analysis used to calculate a single, common k (k_c) for a negative binomial distribution. The open circles represent data points excluded from the regression.

평균밀도- $1/k$ 는 약한 관계가 있었으나 \log_{10} (평균밀도)- $1/k$ 관계가 없는 것으로 나타났으며, 그 결정계수는 각각 0.0319와 0.1399였다(Fig. 15). 따라서 k_c 값이 모든 개별 k 값을 대체할 수 없는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 방아벌레(Bliss and Owen, 1958)와 굴녹응애(Hall *et. al.*, 1997)에서도 보고되어 있다. 이러한 결과는 일당 평균밀도가 약 1.5마리보다 낮았을 때 개별 k 값의 변이성과 관계가 있었다. 즉, 일당 평균밀도가 1.6~11.8마리에서는 이 경향성이 존재하지 않았기 때문에 이 밀도 범위에서는 하나의 k_c (1.2874)를 갖게 된다. Southwood(1978)는 곤충의 밀도

변화에 따라 분포가 변한다고 하였는데, 본 연구에서도 잎당 평균밀도가 1.5마리를 경계로 분포가 달라지는 것으로 나타났다. 그러나 이와 반대로 밀에서 진딧물(Feng and Nowierski, 1992)과 오렌지에서 굴나무이(Tsai *et. al.*, 2000)의 결과와 같이 밀도에 관계없이 분포가 일정한 것으로 나타나는 경우도 있다.

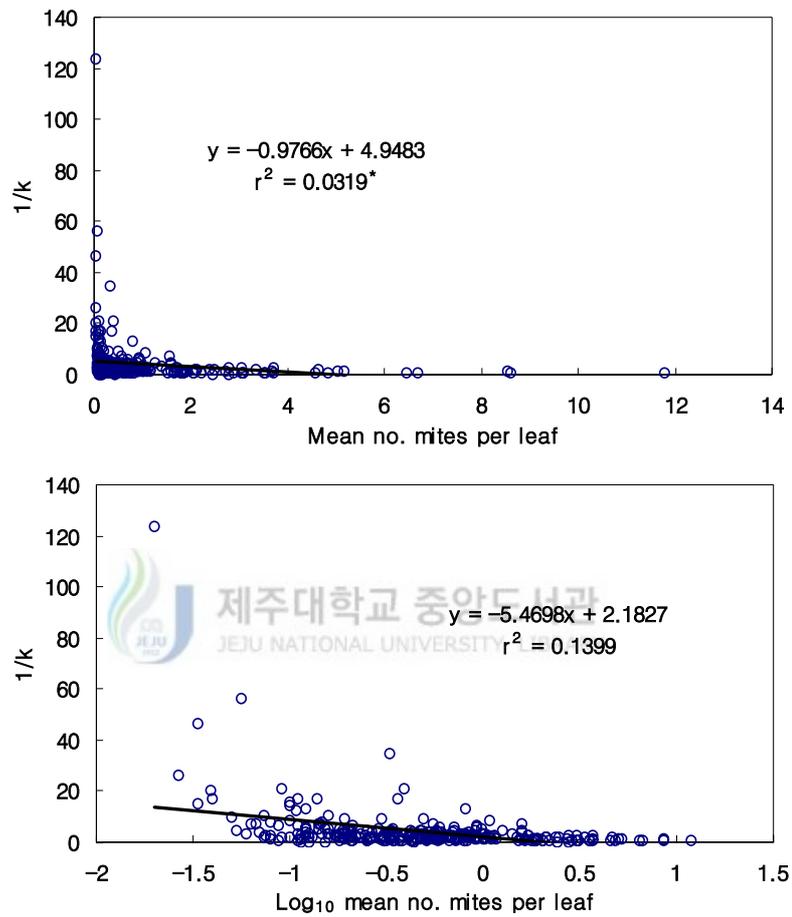


Fig. 15. Relationship between $1/k$ and \log_{10} mean number of citrus red mites per leaf.

k_c 값이 잎당 평균밀도 1.6마리 이하에서는 개별 k 값을 대체할 수 없었기 때문에 평균밀도(m)에 따른 k 값을 추정하기 위하여 회귀분석을 실시하였다: $k=0.7885+0.2896 \times \log_{10}(m)$ (d.f.=1, 275, $F=39.80$, $r^2=0.1233$). 개별, 일반 및 회귀의 k 값으로부터

터 산출된 몇몇의 히스토그램을 비교한 것은 Fig. 16과 같다. 굴응애의 일당 평균밀도가 0.50과 1.01마리일 때 실측치와 개별, 일반과 회귀의 k 값으로부터 산출된 기대치와의 카이제곱검정 결과는 차이가 없었다. 또한, 실측치와 기대치의 상관관계수 범위는 평균밀도 0.5마리일 때 0.955~0.999로 1.01마리 0.923~0.981보다 높았다. 한편, 굴응애 평균밀도가 2.05와 3.04마리일 때 개별과 일반 k 값에 대한 실측치와 기대치와의 카이제곱검정 결과는 차이가 없었지만, 회귀 k 값과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 육안으로는 비슷한 경향이였다. 실측치와 기대치의 상관관계수는 평균밀도 2.05마리일 때는 0.939~0.990, 평균밀도 3.04마리일 때는 0.910~0.975이었는데, 카이제곱검정에서 다른 것으로 나타난 회귀 k 값에서 산출된 실측치와 기대치 사이의 상관관계수도 각각 0.939와 0.975로 높게 나타났다.

총 281개의 자료에 대해 카이제곱검정을 실시한 결과 개별 k 값에 기초한 경우 263개(93.6%), k_c 는 232개(82.6%), 회귀 k 는 226개(80.4%)가 부(-)의 이항분포(NBD)를 따르는 것으로 나타났다. 본 검정에서 NBD를 따르지 않는 것으로 나타난 것은 개별 k 값에서는 일당 평균밀도가 0.1~0.5마리와 2.4~3.5마리의 범위에서 각각 8과 6개였으며, k_c 에 기초한 것은 평균밀도가 k 값과 경향을 갖고 있는 것으로 나타난 평균밀도 1.6마리 이하에서 47개로 NBD를 따르지 않는 것의 95.9%를 차지하였다. 회귀 k 값에 기초로 한 경우 일당 평균밀도가 1.0마리 이상에서 NBD를 따르지 않는 65개중 44개(67.7%)였으며, NBD를 따르지 않는 226개의 80%를 차지하였다. 그러나 이는 평균과 k 값 사이에 경향성이 있었던 일당 평균밀도 1.6마리 이하에서는 18개로 k_c 값을 기초로 한 경우와 반대의 경향이 나타났다. 실측치와 개별, 일반 그리고 회귀 k 값으로 산출한 기대치와의 상관관계수 범위는 각각 0.221~0.999, 0.698~0.999와 0.327~0.999였으며, NBD를 따르지 않는 것으로 나타난 자료의 상관관계수는 각각 0.221~0.995, 0.873~0.999와 0.327~0.998로 나타났다. 상관관계수가 0.900이상으로 높았던 자료의 비율이 개별과 일반, 회귀의 k 값에서 각각 88.6, 92.5와 90.0%이었다. 따라서 굴응애의 분포는 NBD에 적합한 것을 나타냈지만, 이와 같은 분포특성은 과수원에서 굴응애의 분산에 영향을 주는 농약살포 등과 같은 외부 요인에 의해 부정적으로 영향을 받을 수 있다.

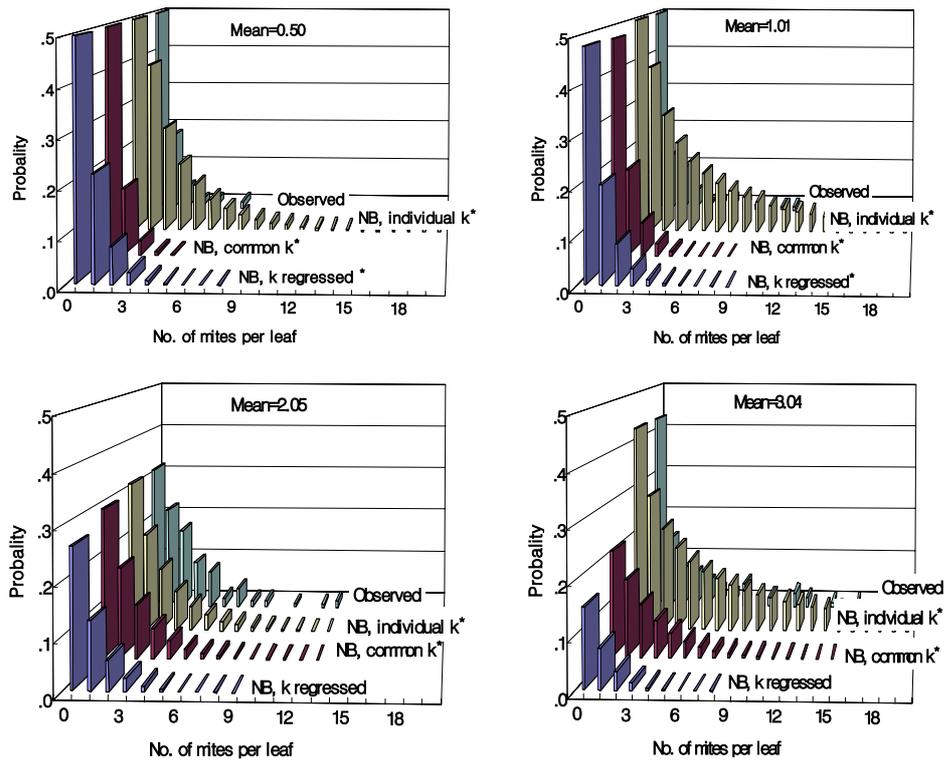


Fig. 16. Probability of observed counts of citrus red mites per leaf compared to counts projected from negative binomial (NB) distributions derived from individual, common and regressed k -values (largest observed counts shown, probabilities below or above 0.50 not shown). An asterisk(*) indicates the observed histogram followed the projected histogram based on a chi-square test ($\alpha=0.05$).

계수 자료가 NBD를 따르고 k 값이 알려져 있을 때 평균밀도의 추정은 최소한 1 마리 이상 존재하는 표본의 비율에서 추정할 수 있다(Southood, 1978). 일당 평균밀도와 NBD에 기초한 발생엽율과의 관계는 Fig. 17과 같다. 꺾임애가 발생하지 않은 잎의 비율과 일당 평균밀도간에는 직선적인 관계를 갖고 있었으며, r^2 값이 0.9352로 매우 높았으나, 꺾임애 밀도가 증가할수록 발생엽율에 의한 추정이 부정확해지는 것을 알 수 있다. 이는 높은 밀도에 대한 추정의 정확도를 높이기 위해서는 tally threshold를 증가시켜야 한다는 것을 나타내주는 것이다.

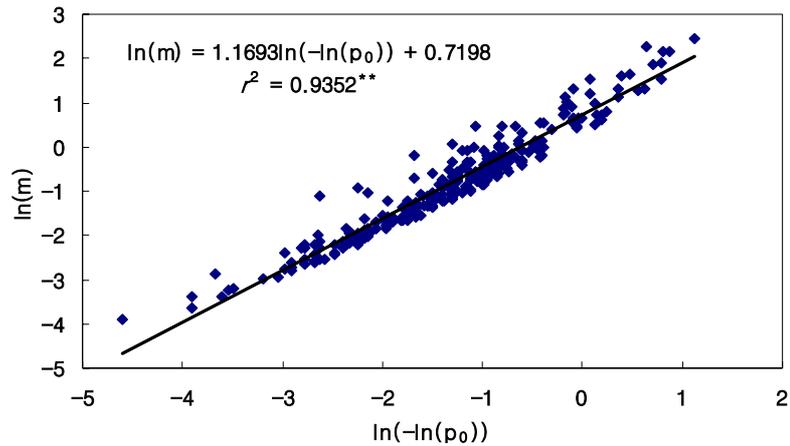


Fig. 17. Relationship between the mean density (m) of citrus red mites per leaf and the proportion of sample units with no mite (p_0).

나. 부(-)의 이항표본조사법

NBS를 개발하는 방법으로 상수 k 를 구하는 방법에 따라 기본모델과 Wilson and Room의 모델이 주로 이용된다. tally threshold에 따른 $\ln(m)$ 과 $\ln(-\ln(1-P_T))$ 의 회귀식에서 구한 함수식은 Table 15와 같다.

Table 15. Parameters of the negative binomial model $\ln(m)=\alpha+\beta\ln[-\ln(1-P_T)]$ relating mean mites per leaf to the proportion of leaves infested with at least T mites

T	α	β	N	r^2	P_m	S_p^2	MSE
Basic model							
1	0.6123	1.1703	287	0.97	-1.3155	0.04167	0.04926
2	1.0479	0.7709	277	0.94	-2.3908	0.03537	0.07136
3	1.1639	0.5717	284	0.87	-3.3707	0.05107	0.19770
Wilson & Room's model							
1	0.7035	1.2134	190	0.99	-1.0939	0.00013	0.00019
2	1.7394	1.2349	181	0.86	-2.0246	0.23790	0.23929
3	1.8899	1.0607	174	0.73	-2.5469	0.40895	0.48480

기본모델에서 r^2 의 값은 $T=1$ 이 0.97로 가장 높았으며, T 값이 상승할수록 결정계수

가 낮아지는 경향이였다. 또한, MSE 의 값은 $T=1$ 에서 가장 적어 $T=1$ 일 때 이항표본조사에 가장 알맞은 것으로 판단되었다. Wilson & Room의 모델에서는 $T=1$ 일 때 r^2 값이 0.99로 가장 높았으며, MSE 값도 0.00019로 가장 낮았다. 따라서, NBS에서 tally threshold는 1이 가장 알맞았는데, 이는 경험모델($T=2$)과 다르게 나타났으며, NBS의 개발에 r^2 값이 더 높은 Wilson & Room의 모델을 이용하기로 한다.

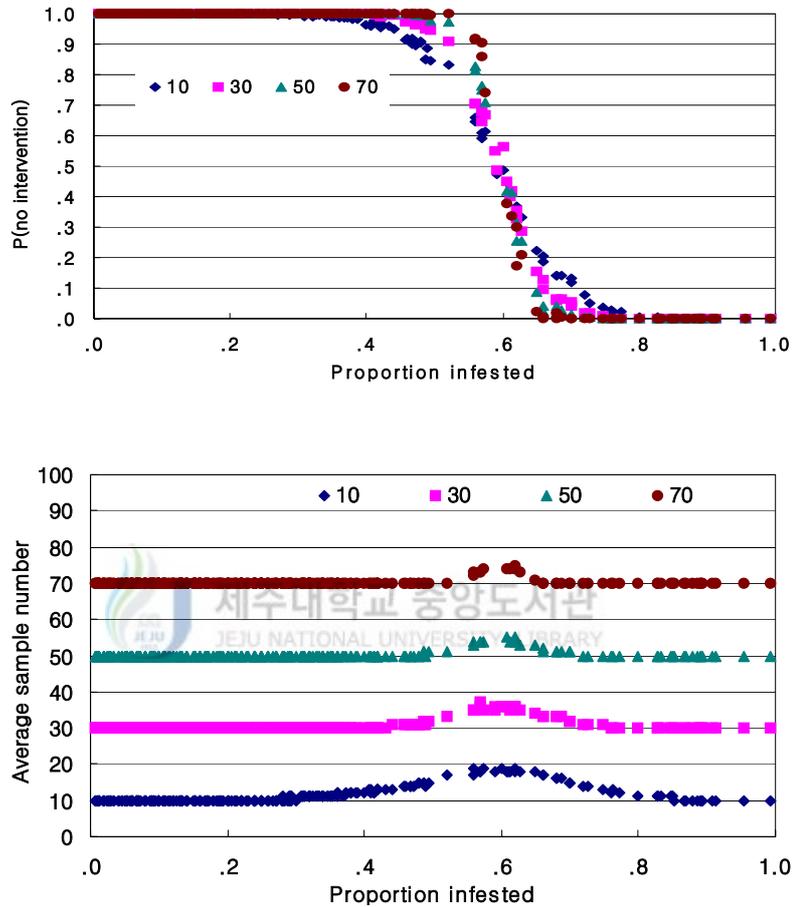


Fig. 18. Operating characteristic (OC) and average sample number (ASN) curves based on Wilson and Room's negative binomial sampling plan for different minimum sample size of 10, 30, 50, and 70.

최소표본크기가 10, 30, 50과 70일 때 굴응애의 발생엽율에 따른 작용특성(OC)과 평균표본크기(ASN)는 Fig. 18과 같다. 최소표본크기가 클수록 OC가 기각 또는 수락하지 못하는 영역이 줄어드는 경향을 보였다. 최소 표본크기가 10일 때 올바른

의사를 결정할 수 있는 발생엽율(일당 평균밀도)의 범위는 $P_T \geq 0.29(0.55)$ 또는 $P_T \geq 0.85(4.39)$, 최소표본크기 30일 때 $P_T \geq 0.41(0.93)$ 또는 $P_T \geq 0.76(3.11)$, 최소표본크기 50일 때 $P_T \geq 0.49(1.25)$ 또는 $P_T \geq 0.72(2.71)$ 이었으며, 최소표본크기 70일 때 $P_T \geq 0.52(1.39)$ 또는 $P_T \geq 0.66(2.22)$ 이었으며, 최소표본의 크기가 클수록 잘못된 의사결정을 내릴 수 있는 범위가 줄어들었다. 최소표본크기가 10일 때는 P값이 0이 되는 일당 평균밀도는 4.39마리 이상이었으나, 최소표본크기가 70일 때는 일당 평균밀도가 2.22마리 이상으로 최소표본크기가 커야 하는 것으로 나타났다. 이는 경험모델과 비교했을 때 최소표본크기의 증가가 의사결정을 위한 일당 평균밀도에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 최소표본크기에 관계없이 요방제수준인 0.63 부근에서의 P값은 표본크기에 관계없이 0.5에 가까웠다.

ASN은 최소표본크기에 관계없이 요방제수준에서 가장 컸으며, 그 지점에서 멀어질수록 평균표본수는 적어졌다. ASN의 최대값은 최소표본크기 10, 30, 50과 70일 때, 각각 18, 37, 55와 75였으며, 최소표본크기가 커질수록 최소표본크기와의 차가 줄어드는 경향이였다. 이는 경험모델에서와 비슷한 경향이였으며, 최소표본크기 50 이상은 별다른 차이를 보이지 않았다. 따라서 최소표본크기는 50개이면 알맞은 것으로 나타났으나, 조사의 효율성을 고려한다면 10보다 크면 될 것으로 판단된다.

요방제수준(action threshold)을 일당 1.0, 2.0과 3.0마리로 했을 때 95% 신뢰구간을 이용한 의사결정선에 대한 조건표는 Table 16과 같다. 일당 굴응에 평균밀도가 2.0마리일 때 1마리 이상의 응애가 존재하는 잎의 비율은 0.63이었으며, 이 값을 이용하여 상한(UL)과 하한(LL) 값을 구했다. 의사결정은 주당 10엽을 조사하는 경우 1주만 조사하더라도 의사결정이 가능하였으나, 확률변수의 분포가 근사적으로 표준정규분포를 따르기 위해서는 $np > 5$ 이고 $n(1-p) > 5$ 이어야 하는데, 1주를 조사했을 때는 이 조건을 충족시키지 못해 제외하였다. 조사한 나무수까지 1개 이상의 굴응애가 존재하는 잎의 누적수가 UL 이상이면 조사를 중지하고 “방제”로 의사를 결정하고, 그 누적수가 LL 이하일 때도 조사를 중지하고 “무방제”로 의사를 결정하게 된다. 그러나 누적수가 UL과 LL 사이에 있을 때는 조사를 계속 실시하게 된다. 요방제밀도가 2.0마리이고 10주를 조사했을 때 “방제”로 의사결정을 내리기 위해서는 1마리 이상 굴응애가 존재하는 누적잎수가 73개 이상이어야 하고, “무방제”는 53개

이하가 되어야 한다.

Table 16. The stop limits calculated using 95% confidence intervals for decision-making citrus red mite population levels based on action thresholds of 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf

No. trees sampled	Action thresholds(m_T) ^a					
	$m_T=1.0$		$m_T=2.0$		$m_T=3.0$	
	LL ^b	UL ^c	LL	UL	LL	UL
1	-	-	-	-	-	-
2	4	13	8	17	11	19
3	7	19	13	25	17	28
4	11	24	19	32	24	36
5	14	29	24	39	31	44
6	18	34	30	46	38	52
7	21	39	36	52	45	60
8	25	43	41	59	52	68
9	29	48	47	66	59	76
10	33	53	53	73	66	84
11	37	58	59	80	73	92
12	40	63	65	86	80	100
13	44	67	70	93	87	108
14	48	72	76	100	94	115
15	52	77	82	106	102	123
16	56	81	88	113	109	131
17	60	86	94	120	116	139
18	64	91	100	126	123	147
19	68	95	106	133	130	155
20	72	100	112	140	137	162
Stop sampling						

^{a, b, c} See Table 12.

Wald의 SPRT를 이용하면 의사결정을 위한 상한과 하한선의 기울기와 절편값을 얻을 수 있다. 이 직선식을 이용하여 95% 신뢰수준에서의 상한과 하한값을 얻은 것과 같은 조건표를 만들 수 있다(Table 17). 조사중지를 판단하기 위해 필요한 나무수는 요방제수준 1.0과 2.0에서는 2주를 조사하면 가능했으나, 3.0에서는 조사 상한을 결정하기 위해서는 4주를 조사해야 하는 것으로 나타났다. 95% 신뢰구간을 이용한 의사결정선은 조사나무수가 커질수록 상한과 하한의 폭이 증가하였으나,

SPRT에서는 조사나무수와 상, 하한의 폭은 관계가 없었다. 즉, 요방제밀도가 잎당 2.0마리이고 5주를 조사했을 때 “방제”로 의사결정을 하기 위해서는 95% 신뢰구간을 이용하면 누적잎수가 39개이지만, SPRT에서는 32개이며, “무방제”는 각각 24와 28개였다.

Table 17. A Wald’s sequential probability ratio test for classification of citrus red mite population levels at action thresholds of 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf

No. trees sampled	Action thresholds(m_T) ^a					
	$m_T=1.0$		$m_T=2.0$		$m_T=3.0$	
	LL ^b	UL ^c	LL	UL	LL	UL
1	-	-	-	-	-	-
2	7	10	10	14	13	-
3	11	14	16	20	20	-
4	15	18	22	26	28	32
5	19	22	28	32	35	40
6	23	27	34	38	43	47
7	27	31	40	44	50	55
8	31	35	46	50	58	62
9	36	39	52	56	65	70
10	40	43	58	62	73	77
11	44	47	64	68	80	85
12	48	52	70	74	88	92
13	52	56	76	80	95	100
14	56	60	81	86	103	107
15	61	64	87	92	110	115
16	65	68	93	98	118	122
17	69	72	99	104	125	130
18	73	76	105	110	133	138
19	77	81	111	116	140	145
20	81	85	117	121	148	153
Stop sampling						

^{a, b, c} See Table 12.

95% 신뢰한계(95% CI)와 축차확률검정(SPRT)을 이용한 이항표본조사법을 회천 지역의 자료에 대해 100회 simulation을 한 결과는 Table 18과 같다. 이용한 자료의 잎당 평균밀도범위는 0.60~4.05마리였다. 조사에 필요한 나무수는 95% CI는 2.10~8.02주, SPRT는 2.00~2.53주로 SPRT가 필요 나무수가 적었으며, 밀도에 따른 변

화의 폭도 좁았다. 95% CI의 경우 잎당 평균밀도가 2.07(2000년 8월 29일)과 2.26마리(2000년 9월 21일)에서 20주까지 조사하더라도 의사결정을 할 수 있는 비율이 모두 51%이었으나, SPRT는 모든 밀도 범위에서 100% 의사결정을 할 수 있는 것으로 나타났다. 요방제 밀도인 잎당 2.07마리(2000년 8월 29일)일 때 95% CI와 SPRT의 평균 조사 나무수는 각각 4.10와 2.46주로 가장 많은 나무수가 필요했으며, 그러나 잘못된 의사결정을 내리는 비율은 SPRT가 95% CI보다 높은 경향이였다.

Table 18. Summary of 100 simulations of negative binomial sampling model by 95% confidence intervals (95% CI) and a Wald's sequential probability ratio test (SPRT) for Hoicheon area data sets

Date (Year)	Mean density	Method	% decision-making	% incorrect classifying	Mean no. trees sampled
25 Jul. (2000)	3.50	95% CI	100	11	4.46(20)
		SPRT	100	24	2.24(4)
17 Aug.	2.07	95% CI	51	-	4.10(15)
		SPRT	100	12	2.46(5)
21 Sept.	2.26	95% CI	51	-	3.90(11)
		SPRT	100	35	2.47(9)
23 Apr. (2001)	1.42	95% CI	100	0	3.11(10)
		SPRT	100	7	2.29(8)
8 Jul.	0.60	95% CI	100	0	2.72(10)
		SPRT	100	0	2.16(5)
18 Jul.	0.91	95% CI	100	2	6.47(21)
		SPRT	100	38	2.53(7)
12 Sept.	4.05	95% CI	100	0	2.10(4)
		SPRT	100	0	2.00(2)

^a Maximum number of trees sampled.

4. 표본조사법의 유효성 평가

개발된 조사계획의 이용한계를 정하기 위하여 실제포장에서의 조사자료에 의해 평가하는 것은 매우 중요하다(Naranjo and Hutchison, 1997). 본 연구에서는 이를 위해 resampling 기술인 Naranjo와 Hutchison (1997)이 개발한 RVSP simulation을 이용하여 평가하였다. 그리고 개발한 축차표본조사법과 경험이항표본조사법, 부(-)의 이항표본조사법을 평가하기 위하여 이용한 자료의 나무를 임의로 선택하여 Microsoft Excel에 데이터베이스를 만들어 의사결정에 필요한 표본수(나무수)를 조사하였다. 사용한 자료는 2000년부터 2002년까지의 자료중 TPL 추정에 이용하지 않았던 회천(9), 월산(4), 의귀(4)에서의 조사자료를 사용하였으며, 일당 평균밀도는 0.17~4.33마리였다.

가. Green의 축차표본조사법

RVSP의 Green의 축차표본조사법에 대해 나무내의 TPL 상수값을 이용하여 평가한 결과는 Table 19와 같으며, 이 때의 최소표본크기는 10으로 하였다. 실제 표본조사밀도와 simulation을 통해 얻어진 평균 밀도와는 유사한 경향을 보였으며, 정확도 수준이 낮을수록 관측치에서 떨어지는 경향이였다. 기대 정확도 수준보다 낮은 경우는 회천지역에서 2000년 9월 21일, 2001년 4월 23일과 6월12일, 월산지역의 2001년 5월 6일이었으며, 이들을 제외한 나머지는 모두 기대 정확도 수준보다 높았다. 평균밀도가 낮을수록 그리고 정확도가 높을수록 평균표본크기는 증가하는 경향이였으며, 가장 많은 표본이 필요로 했던 것은 회천지역의 2001년 6월 12일 자료로 일당 평균밀도는 0.17마리였으며, 기대정확도 수준 0.25에서 154일이였다. 회천의 2001년 6월 12일과 월산의 2001년 5월 6일 조사자료에 대해 기대 정확도 수준 0.20에서는 필요한 표본크기가 조사한 표본크기보다 더 컸기 때문에 simulation 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 정확도 수준을 0.25로 하는 경우 사용한 모든 밀도에서 일간 TPL 상수를 이용할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 19. RVSP statistics of 500 sequential simulation runs for leaf sampling estimates of citrus red mite on independent data sets

Groves	Date (Year)	Data set		Simulation			
		Estimated density	n	Desired precision	Mean density	Mean precision	Mean sample size
Hoichen	25 Jul. (2000)	3.50	240	0.20	3.61	0.19	31
				0.25	3.64	0.24	20
				0.30	3.66	0.28	14
	29 Aug.	2.07	240	0.20	2.08	0.19	45
				0.25	2.15	0.24	29
				0.30	2.19	0.28	20
	21 Sept.	2.26	240	0.20	2.37	0.23	42
				0.25	2.45	0.29	27
				0.30	2.42	0.33	20
	23 Apr. (2001)	1.42	240	0.20	1.47	0.26	58
				0.25	1.57	0.32	37
				0.30	1.60	0.37	27
	12 Jun.	0.17	240	0.20	- ^a	-	-
				0.25	0.19	0.40	154
				0.30	0.21	0.47	108
	8 Jul.	0.60	240	0.20	0.61	0.15	103
				0.25	0.62	0.18	66
				0.30	0.62	0.22	46
18 Jul.	0.91	240	0.20	0.91	0.15	78	
			0.25	0.94	0.18	49	
			0.30	0.94	0.22	35	
17 Aug.	2.00	240	0.20	2.03	0.17	45	
			0.25	2.03	0.21	30	
			0.30	2.10	0.24	21	
12 Sept.	4.05	240	0.20	4.12	0.16	28	
			0.25	4.23	0.20	18	
			0.30	4.17	0.23	13	
Wolsan	22 Apr. (2001)	1.29	150	0.20	1.32	0.18	61
				0.25	1.35	0.23	39
				0.30	1.35	0.27	28
	6 May	4.33	150	0.20	4.53	0.22	27
				0.25	4.54	0.27	18
				0.30	4.64	0.32	13
11 Jul.	0.29	150	0.20	-	-	-	
			0.25	0.30	0.21	107	
			0.30	0.31	0.25	75	

Table 19. Continued

Groves	Date (Year)	Data set			Simulation		
		Estimated density	n	Desired precision	Mean density	Mean precision	Mean sample size
Wolsan	19 Aug.	3.09	150	0.20	3.15	0.20	34
				0.25	3.32	0.24	22
				0.30	3.25	0.28	16
Euigwi	28 Apr. (2002)	0.53	150	0.20	0.55	0.15	110
				0.25	0.55	0.19	72
				0.30	0.55	0.23	50
	6 May	2.03	150	0.20	2.07	0.17	45
				0.25	2.09	0.21	29
				0.30	2.10	0.26	21
11 Jul.	3.57	150	0.20	3.63	0.15	31	
			0.25	3.70	0.18	20	
			0.30	3.76	0.22	14	
19 Aug.	1.83	150	0.20	1.81	0.16	49	
			0.25	1.84	0.19	32	
			0.30	1.88	0.23	22	

^a Results are not at D=0.20 because expected sequential sample size was higher than sample number from data set.

RVSP의 Green의 축차조사법에 대해 나무간의 TPL 상수값을 이용하여 평가한 결과는 Table 20과 같으며, 최소 표본크기는 10주로 하였다. 나무당 평균밀도의 범위는 1.8~43.3마리였다. simulation을 통해 얻은 평균밀도는 실지 표본조사 밀도와 비슷하였다. 기대정확도수준과 simulation을 통해 얻은 정확도와는 회천의 4월 23일 조사자료를 제외하고는 대부분 더 높은 정확도를 나타내었다. 이는 Table 19의 옆에 대한 평가보다 더 좋은 것이었으나 정확도 수준이 0.25일 때 나무당 평균밀도가 3마리 이하인 경우에는 적용되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 평균밀도의 추정에서 정확도 수준과의 관련성이 Table 19에 비해 떨어지는 것으로 나타났는데, 이는 표본분산이 옆보다 나무에서 더 높았기 때문이다. 평균표본크기는 나무당 평균밀도가 10이하로 낮은 경우에만 최소표본크기보다 높았다.

Table 20. RVSP statistics of 500 sequential simulation runs for tree sampling estimates of citrus red mite on independent data sets

Groves	Date (Year)	Data set		Simulation			
		Estimated density	n	Desired precision	Mean density	Mean precision	Mean sample size
Hoichen	25 Jul. (2000)	35.0	24	0.20	35.6	0.16	10
				0.25	35.7	0.17	10
				0.30	36.0	0.16	10
	29 Aug.	20.7	24	0.20	20.3	0.15	10
				0.25	20.3	0.16	10
				0.30	20.2	0.16	10
	21 Sept.	22.6	24	0.20	22.5	0.22	10
				0.25	22.5	0.22	10
				0.30	22.5	0.22	10
	23 Apr. (2001)	14.3	24	0.20	14.4	0.29	12
				0.25	13.7	0.32	10
				0.30	13.6	0.32	10
	12 Jun.	1.8	24	0.20	- ^a	-	-
				0.25	-	-	-
				0.30	1.80	0.38	15
	8 Jul.	6.0	24	0.20	6.13	0.15	18
				0.25	6.13	0.18	12
				0.30	6.02	0.19	10
	18 Jul.	9.1	24	0.20	9.37	0.17	14
				0.25	9.23	0.20	10
				0.30	9.12	0.21	10
17 Aug.	20.0	24	0.20	20.5	0.18	10	
			0.25	20.6	0.18	10	
			0.30	20.5	0.18	10	
12 Sept.	40.5	24	0.20	41.5	0.13	10	
			0.25	41.2	0.13	10	
			0.30	41.5	0.13	10	
Wolsan	22 Apr. (2001)	43.3	15	0.20	44.9	0.28	10
				0.25	45.0	0.28	10
				0.30	44.6	0.28	10
	6 May	2.9	15	0.20	-	-	-
				0.25	-	-	-
				0.30	3.17	0.26	11
	11 Jul.	30.9	15	0.20	30.4	0.23	10
				0.25	30.5	0.23	10
				0.30	30.4	0.23	10

Table 20. Continued

Groves	Date (Year)	Data set		Simulation			
		Estimated density	n	Desired precision	Mean density	Mean precision	Mean sample size
Wolsan	19 Aug.	12.9	15	0.20	12.9	0.22	12
				0.25	12.5	0.25	10
				0.30	12.5	0.25	10
Euigwi	28 Apr. (2002)	5.3	15	0.20	-	-	-
				0.25	5.49	0.26	12
				0.30	5.38	0.29	10
	6 May	20.3	15	0.20	20.6	0.16	10
				0.25	20.6	0.16	10
				0.30	20.5	0.16	10
	11 Jul.	35.7	15	0.20	35.4	0.11	10
				0.25	35.2	0.11	10
				0.30	35.3	0.11	10
19 Aug.	18.3	15	0.20	18.0	0.17	10	
			0.25	17.9	0.17	10	
			0.30	17.9	0.17	10	

^a See Table 19.

평균 표본크기는 10~18주였으며, 나무당 굴응애 밀도가 5.3마리 이하인 회천의 2001년 6월 12일과 월산의 5월 6일 조사에서 기대 정확도 0.20과 0.25, 의귀의 2002년 4월 28일 조사에서 기대 정확도 0.20에서 기대 표본크기가 조사 표본크기 보다 높았던 것을 제외한 나머지는 모두 조사 표본크기보다 적은 수의 조산나무가 필요했다. 특히 나무당 평균밀도가 10마리 이상인 경우 평균표본크기가 최소표본크기인 10주였는데, 이는 나무당 평균밀도를 추정하는데 조산나무수가 10주면 충분하다는 것을 나타낸다.

나. 고정표본크기 이항조사법

RVSP의 FSS를 이용하여 이항표본조사법에 대해 유효성을 평가한 것은 Table 21과 같다. 요방제수준은 0.63, tally threshold는 1, 고정표본크기는 50으로 하였다. 조사자료의 굴응애가 1마리 이상 존재하는 잎의 비율(PI)은 0.07~0.93이었다. 500 simulation을 했을 때의 PI와 평균밀도는 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 필요한 표본크기는 10~18엽으로 나무당 10엽을 조사하는 경우 1~2주가 필요한 것으로 나타났으며, 요방제수준의 발생엽율인 0.63에 가까울수록 증가하였고, 작용특성(OC) 값이 0 또는 1에 가까울수록 적어지는 경향이였다. 의사결정에 오류가 발생할 확률

을 나타내는 OC의 값은 PI값이 발생엽율 0.39까지는 1.0, 0.79이상은 0.0을 나타내었다. 즉, PI값이 0.39이하에서는 무방제로, 0.79이상은 방제로 의사결정이 될 확률이 100%임을 말해주는 것이다. 요방제수준으로 설정한 0.63부근에서의 OC값은 0.5에 가까워지는 경향을 보였다.

Table 21. Resampling validation of fixed-size binomial plan for independent collected data sets based on negative binomial counts with the tally threshold of 1 mites per leaf

Groves	Date (Year)	Complete count			Average statistics over 500 simulation ^a			
		PI ^b	Density	<i>n</i>	Density	PI	ASN ^c	OC ^d
Hoichen	25 Jul. (2000)	0.75	3.5	240	3.50	0.75	13	0.020
	29 Aug.	0.63	2.07	240	2.06	0.63	17	0.488
	21 Sept.	0.63	2.26	240	2.24	0.63	18	0.474
	23 Apr. (2001)	0.40	1.42	240	1.40	0.39	12	1.000
	12 Jun.	0.07	0.17	240	0.18	0.07	10	1.000
	8 Jul.	0.39	0.6	240	0.61	0.39	12	1.000
	18 Jul.	0.51	0.91	240	0.91	0.50	15	0.984
	17 Aug.	0.71	2	240	2.00	0.72	14	0.060
	12 Sept.	0.93	4.05	240	4.02	0.93	10	0.000
Wolsan	22 Apr. (2001)	0.75	4.33	150	4.34	0.75	13	0.012
	6 May	0.21	0.29	150	0.30	0.22	10	1.000
	11 Jul.	0.80	3.09	150	3.08	0.79	12	0.000
	19 Aug.	0.53	1.29	150	1.28	0.52	17	0.964
	Euigwi	28 Apr. (2002)	0.32	0.53	150	0.54	0.32	11
6 May		0.70	2.03	150	2.03	0.70	15	0.100
11 Jul.		0.87	3.57	150	3.58	0.87	10	0.000
19 Aug.		0.67	1.83	150	1.78	0.69	16	0.150

n, Number of sample sizes for each data set.

^a Number of sample size for a fixed sample size binomial sampling plan was 50. And the required parameters, lower bound and upper bound, α and β for Wald's sequential plan were 0.43, 0.75, 0.10 and 0.10, respectively.

^b Proportion of infested leaf.

^c Average sample number.

^d Operating characteristic.

Wald의 축차확률검정법은 나무의 TPL을 무시하고 임의로 잎을 추출하여 조사법의 유효성을 평가하였으나, 감귤원의 경우 잎과 나무 두 계층으로 구분하여 평가하는 것이 필요하다. 따라서 나무 내의 잎은 고정하고 임의로 나무를 선택하여 계층 축차표본조사법(SCS)과 경험이항표본조사법(EBS), 부(-)의 이항표본조사법(NBS)에 대한 유효성을 평가할 필요가 있다(Table 22). 이용한 자료의 조사나무수는 15~24주였으며, 잎당 평균밀도는 0.29~4.33마리였다. 500 simulation을 했을 때 오관할 확률이 가장 높았던 것은 EBS와 NBS는 의귀지역 2002년 8월 19일(잎당 평균밀도=1.83마리, EBS와 NBS의 PI=0.47과 0.67) 자료로 각각 70.0과 81.0%이었는데, 이때 SCS는 26.2%였다. SCS가 오관할 확률이 가장 높았던 것은 의귀지역 5월 6일(잎당 평균밀도=2.03마리, EBS와 NBS의 PI=0.45과 0.70)자료로 51.4%이었으나, EBS와 NBS는 각각 28.6과 1.8%이었다. 고정표본크기와 비교했을 때 표본수의 절감율은 EBS는 82.3~91.7%, NBS는 82.1~91.7%, SCS는 70.7~95.2%였다. 최고절감율은 회천의 7월 12일 조사자료였으며, 잎당 평균밀도는 0.17마리였다. 의사결정에 필요한 평균 나무수는 EBS는 2.00~2.65주, NBS는 2.00~2.69주, SCS는 1.14~4.40주였다. 최대 표본수가 필요한 것으로 나타난 것은 의귀지역 2002년 5월 6일 조사였으며, 잎당 평균밀도는 2.03마리였다. simulation중 최대 조사나무수는 EBS, NBS와 SCS에서 각각 14, 10과 17주였다.

방제 의사결정을 위해 필요한 평균 조사나무수는 모두 5주 이하였는데, 특히 NBS는 잎당 평균밀도가 요방제수준(잎당 평균밀도=1.0마리)에 가까웠을 때 최대 조사나무수는 10주, 필요한 조사나무수의 중앙값은 2주로 가장 적었다. 이는 나무간 TPL 상수를 이용한 Green의 축차표본조사법 평가에서와 비슷한 경향을 보여주었다. 따라서 곽응애 표본조사에서 최대 조사나무수를 10주로 하면 과수원의 평균밀도 추정뿐만 아니라 방제 의사결정에서도 타당할 것으로 판단되었다.

Table 22. Summary of 500 simulations of citrus red mite adult sampling for the empirical binomial sampling plan (EBS), the negative binomial sampling plan (NBS) and sequential cluster sampling plan (SCS)

Groves	Date (Year)	PI ^a	Mean density	Sampling plan	% incorrect classifying	Mean number of trees sampled	% Saving as compared to fixed sample size	Median number of trees sampled
Hoichen (2000)	25 Jul.	0.61	3.5	EBS	9.4	2.21	91.5	2(2~5)
		0.75		NBS	15.2	2.28	90.5	2(2~5)
				SCS	7.8	1.58	93.4	1(1~7)
	29 Aug.	0.45	2.07	EBS	24.0	2.51	90.3	2(2~7)
		0.63		NBS	35.8	2.53	90.3	2(2~7)
				SCS	45.4	4.36	81.8	4(1~17)
	21 Sept.	0.43	2.26	EBS	47.2	2.41	90.7	2(2~6)
		0.63		NBS	38.2	2.63	89.1	2(2~10)
				SCS	40.0	2.38	90.1	2(1~9)
	23 Apr. (2001)	0.26	1.42	EBS	11.0	2.25	91.3	2(2~4)
		0.40		NBS	7.2	2.22	90.8	2(2~8)
				SCS	15.6	1.84	92.3	1(1~7)
	12 Jun.	0.03	0.17	EBS	0.0	2.00	91.7	2(2)
		0.07		NBS	0.0	2.00	91.7	2(2)
				SCS	0.0	1.14	95.2	1(1~2)
	8 Jul.	0.16	0.6	EBS	0.0	2.05	92.1	2(2~3)
		0.39		NBS	2.4	2.16	91.0	2(2~5)
				SCS	0.0	1.48	93.8	1(1~3)
	18 Jul.	0.25	0.91	EBS	5.6	2.29	91.2	2(2~6)
		0.51		NBS	27.8	2.51	89.6	2(2~8)
				SCS	0.0	1.81	91.5	2(1~5)
	17 Aug.	0.46	2.00	EBS	40.4	2.35	90.9	2(2~14)
		0.71		NBS	14.6	2.51	89.5	2(2~10)
				SCS	48.4	3.41	85.8	3(1~12)
	12 Sept.	0.75	4.05	EBS	0.0	2.00	91.7	2(2~3)
		0.93		NBS	0.0	2.00	91.7	2(2)
				SCS	0.0	1.61	93.3	1(1~7)

Table 22. Continued

Groves	Date (Year)	PI ^a	Mean density	Sampling plan	% incorrect classifying	Mean number of trees sampled	% Saving as compared to fixed sample size	Median number of trees sampled
Wolsan	22 Apr. (2001)	0.59	4.33	EBS	21.0	2.15	85.7	2(2~5)
		0.75		NBS	18.0	2.31	84.6	2(2~6)
	6 May	0.05	0.29	SCS	30.4	1.48	90.1	1(1~5)
		0.21		EBS	0.0	2.00	86.7	2(2)
	11 Jul.			NBS	0.0	2.00	86.7	2(2)
				SCS	0.0	1.18	92.1	1(1~2)
19 Aug.		0.60	3.09	EBS	10.4	2.24	85.1	3(2~10)
		0.80		NBS	0.0	2.26	84.9	2(2~6)
				SCS	15.4	2.33	84.5	2(1~10)
Euigwi	28 Apr. (2002)	0.33	1.29	EBS	27.4	2.35	84.3	2(2~5)
		0.53		NBS	32.8	2.43	83.8	2(2~8)
				SCS	2.8	2.47	83.5	2(1~9)
		0.17	0.53	EBS	2.4	2.14	85.8	2(2~4)
		0.32		NBS	0.4	2.06	86.3	2(2~4)
				SCS	0.0	1.34	91.1	1(1~3)
6 May		0.45	2.03	EBS	28.6	2.65	82.3	2(2~9)
		0.70		NBS	1.8	2.69	82.1	2(2~8)
				SCS	51.4	4.40	70.7	4(1~13)
		0.73	3.57	EBS	0.0	2.01	86.6	2(2~3)
		0.87		NBS	0.0	2.00	86.7	2(2)
				SCS	0.0	1.66	89.0	1(1~6)
19 Aug.		0.47	1.83	EBS	70.0	2.42	83.9	2(2~6)
		0.67		NBS	81.0	2.58	82.8	2(2~9)
			SCS	26.2	3.60	76.0	3(1~13)	

^a Proportion of leaf infested.

V. 종합고찰

생태적으로 안전하게 해충을 방제할 수 있는 기술인 병해충종합관리를 위해서는 해충과 천적의 밀도를 정확하면서도 빠르게 추정하고, 이를 바탕으로 신속하게 의사결정을 내리는 것이 중요하다. 본 연구는 제주지역에서 재배되고 있는 감귤원의 문제 해충중의 하나인 귤응애의 공간분포 특성을 파악하고 이를 기초로 한 최적의 표본조사법을 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 1999년부터 2002년까지 잎 채취와 육안조사 방법으로 귤응애 밀도를 조사한 자료를 이용 귤응애의 나무 내 및 나무 간 공간분포의 형태를 분석하였으며, 축차표본조사법과 이항표본조사법을 이용한 의사결정 조건표를 작성하여 이들을 비교, 평가하여 최적표본조사법을 개발하였다(Fig. 19).

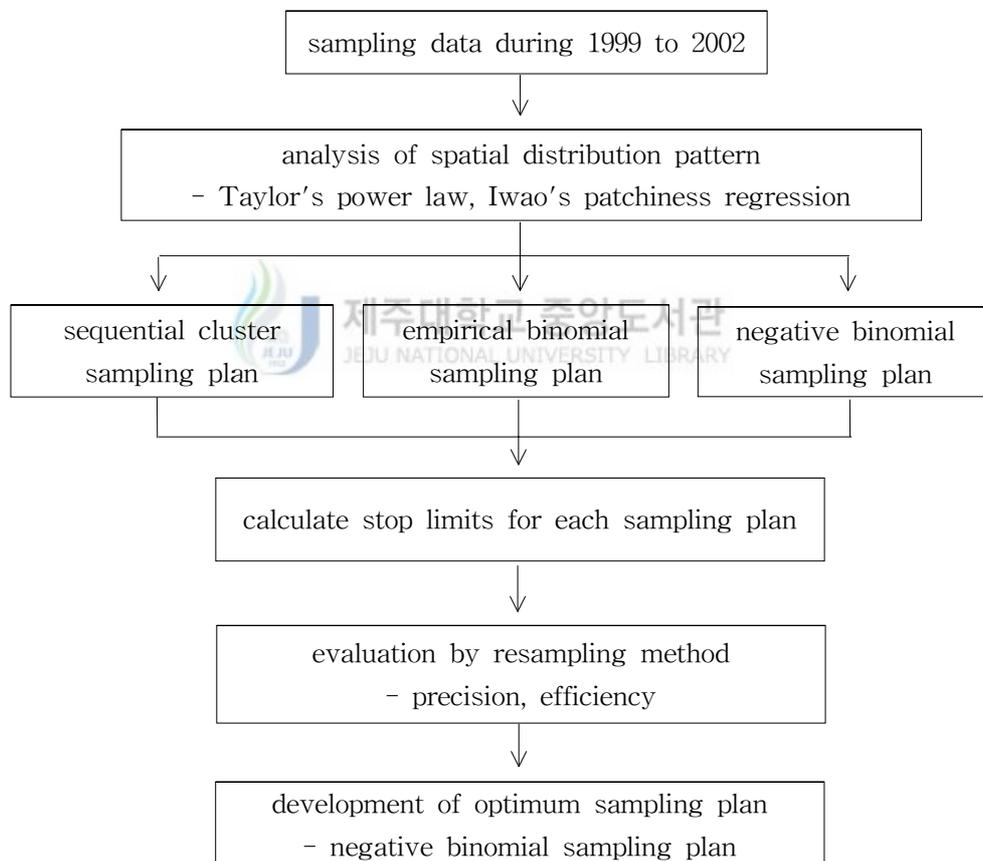


Fig. 19. General scheme for development of optimum sampling plan for citrus red mite.

앞에서 꺾음애의 층태별 분포를 조사한 결과 암컷 성충은 뒷면보다 앞면에 더 많이 분포하였으나, 수컷 성충과 약충, 알은 그와 반대로 분포하고 있었다. 꺾음애 성충의 경우 계절별로 잎의 앞, 뒷면에 분포하는 비율이 저온기인 4월에는 잎 뒷면에 분포하는 비율(55%)이 높았으나 그 이후 온도가 상승함에 따라 잎 앞면에서의 비율이 8월(80%)까지 계속 증가하였고, 9월부터 11월까지의 그 비율이 감소하는 경향을 나타내었다. 잎 앞면(x)과 잎 전체(y)에서의 암컷 성충의 밀도는 $\ln(y+1)=1.2083 \ln(x+1)+0.0488$ 의 직선적인 관계가 있었다($r^2=0.97$). 가을철 잎과 과실에서의 꺾음애 성충밀도는 과실의 성숙도가 높아지면서 꺾음애가 잎보다 과실에 더 많이 분포하고 있었으며, 잎당 꺾음애 평균 밀도를 조사하면 과실에서의 밀도를 추정할 수 있었으나 이 관계식은 조사시기에 따라 다르게 나타났다.

꺾음애의 나무 내 및 나무간 분산지수를 산출하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 모델인 Iwao's patchiness regression(IPR)과 Taylor's power law(TPL)를 이용하였는데, TPL이 IPR보다 꺾음애의 공간분포를 더 잘 설명하였고, 발육단계에 관계없이 집중분포를 하고 있었으며, 집중도는 알>약충>성충의 순으로 높았다. 잎 표면에 따른 분산지수는 성충은 잎의 앞면과 뒷면간에 차이가 없었으나, 약충과 알은 차이가 있었으며, 나무의 안쪽과 바깥쪽 사이에서는 모든 발육단계에서 차이가 없었다. 꺾음애 암컷 성충의 공간분포 형태는 잎간 또는 나무간에 모두 집중분포를 하고 있었는데, 잎보다 나무에서의 집중도가 더 높은 경향이였다. 과수원의 잎당 꺾음애 평균밀도가 일정 마리 이하로 낮더라도 일부 나무는 일정밀도 보다 높은 나무가 존재하며, 최대발생나무의 잎당 평균밀도는 과수원 잎당 평균밀도의 2.2배 높은 것으로 나타났다. 과수원의 잎당 평균밀도(x)와 최대발생나무의 잎당 밀도(y)간에는 직선적인 관계를 갖고 있었으며($y=2.2074x$, $r^2=0.92$), 이를 이용하여 과수원내 일정 밀도이상의 나무분포 비율을 추정할 수 있었다.

단순축차표본조사법을 이용하여 나무당 10엽을 조사하는 경우 나무 내와 나무간의 TPL 상수를 이용하면 방제밀도(2.0마리)에서 필요한 조산나무수는 각각 3과 6주로 나타나 꺾음애 표본조사시 조사에 필요한 잎수 뿐만 아니라 나무수에 대해서도 고려해야 하기 때문에 나무당 조사잎수와 조산나무수를 적정하게 조합하는 것이 알맞은 것으로 나타났다. 계층축차표본조사법에서 나무당 적정 조사엽수는 10매였으

며, 이 때 필요한 나무수는 23주였다. 또한, 점추정과 구간추정법을 이용하여 의사결정선을 구한 결과 구간추정법을 이용하는 것이 적합했다.

이항표본조사법은 일단 굴응애 밀도(m)와 굴응애가 T 마리 이상 존재하는 잎의 비율(P_T)과의 관계를 기본으로 하며, T 는 경험이항표본조사 모형 $[\ln(m) = a + b \ln(-\ln(1 - P_T))]$ 에서의 tally threshold로서 본 연구에서는 1과 2, 3을 사용하였다. 표본조사 모형의 정확도에 T 의 영향이 높은 반면, 표본크기는 거의 영향이 없었다. 경험이항표본조사법의 정확도는 $T=2$ 일 때 가장 높았으며, 발생엽율이 0.2~0.9(일당 평균밀도 0.9~6.3마리)에서의 정확도는 0.3보다 높았다. 작용특성(OC)과 평균표본수(ASN)를 조사한 결과 요방제수준에 가까울수록 잘못된 의사결정을 내릴 확률이 0.5에 가까워졌으며 ASN도 가장 컸다. 최소표본크기가 클수록 정확하게 판단할 수 있는 밀도의 범위가 넓어지는 경향이였다. 굴응애 밀도를 분류하기 위한 표본조사 조건표를 방제밀도 1.0과 2.0, 3.0에 대해 작성하였다.

굴응애 밀도를 계수한 자료중 부(-)의 이항확률분포를 따르는 것이 전체의 93.6%이었으며, 관측치와 기대치의 상관계수는 0.932였다. 일반 $k(k_c)$ 는 1.2874로 계산되었지만, 적합한 일단 굴응애 밀도의 범위는 1.6~11.8마리였다. 일단 평균밀도 0.02~11.8마리의 범위에 대해 부(-)의 이항분포 상수 k 와 평균밀도(m)와의 관계는 $k=0.7885+0.2896 \times \log_{10}(m)$ 이었다.

부(-)의 이항표본조사법을 개발하기 위하여 기본모델과 Wilson and Room의 모델 두가지를 이용하였다. 평균밀도(m)와 T 마리 이상 존재하는 잎의 비율(P_T)과의 관계를 $T=1$ 과 2, 3에 대해 비교하였는데, Wilson and Room의 모델중 $T=1$ 일 때 결정계수가 0.99로 가장 높았다. OC곡선은 요방제 수준에 가까울수록 잘못된 의사결정을 내릴 확률이 0.5에 가까워졌다. 최소표본크기가 클수록 OC에서 올바른 의사결정을 내리는 범위가 증가하였으며, ASN의 차이는 줄어드는 경향이였다. 굴응애 밀도를 분류하기 위한 조건표는 경험모델과 같은 방법으로 작성하였는데, 모델의 정확도를 높이기 위해서는 최소한 20엽(2주)을 조사해야 의사결정이 가능했다.

표본조사법 개발에 이용하지 않았던 17개의 독립된 자료에 대해 표본조사법의 유효성을 평가한 결과 잎과 나무에 대한 Green의 축차표본조사법을 이용한 결과 기대 정확도 수준보다 대부분의 자료에서 더 높은 정확도를 보였다. 고정표본크기법

으로 유효성을 평가했을 때 필요한 조사잎수는 10~18엽으로 나타나 주당 10엽을 조사하는 경우 1~2주면 충분한 것으로 나타났다. Wald의 측차이항확률검정과 계층 측차표본조사법에 대해 검정을 실시한 결과 요방제수준에 가까울수록 의사결정에 필요한 나무수가 증가하였다. 개발된 계층측차표본조사법, 경험이항표본조사법, 부(-)의 이항표본조사법을 비교, 평가하기 위해 나무당 조사엽수를 10개로 고정하고 나무를 임의로 선택하여 의사결정과정을 평가하였는데, Wilson and Room의 부(-)의 이항표본조사 모델이 다른 모델에 비해 표본수의 절감율과 의사결정에 필요한 평균나무수도 적었다. 나무간 TPL 상수를 이용한 Green의 측차표본조사법 평가에서 나무당 평균밀도가 10마리 이상에서 밀도추정에 필요한 평균 조사나무수가 10주 이하였을 뿐만 아니라 모델간 비교, 평가에서 Wilson and Room의 모델에서 최대 필요 나무수가 10주였기 때문에 과수원의 곽응애 평균밀도 추정 및 방제 의사결정에 필요한 조사나무수는 10주가 타당한 것으로 나타났다. 따라서 Wilson and Room의 모델을 이용한 부(-)의 이항표본조사는 곽응애 발생수준을 신속하고 신뢰할 수 있는 예측이 가능하게 해 줄 것으로 판단되었다.

현재 해충의 방제는 해충 생태학을 중심으로 사회, 경제적인 면까지 고려하여 총체적으로 해결하려는 종합방제기로 방제효과의 극대화보다는 방제의 경제, 사회적 합리화를 모색하는 시기이다(현, 1994). 지금까지 해충의 박멸(진멸)이라는 개념으로 해충을 방제해오면서 살충제의 오·남용에 의한 환경오염, 건강에 대한 위험성, 해충의 격발, 천적 등 곤충상의 교란, 이차해충의 해충화, 농약에 대한 저항성 발달 등의 문제가 심각한 실정이다. 그러나, 소비자들의 안전 농산물에 대한 요구 증가와 환경오염에 대한 인식이 제고되면서 유기합성농약의 사용을 최소화할 수 있는 해충 방제 방법이 모색되고 있다. 특히, 정부에서는 친환경농업 육성계획에 의하여 2005년까지 1999년 기준으로 농약 사용량을 30% 줄이기 위해 노력하고 있으며, 이를 위해서는 병해충종합관리기술의 채용이 필수적이다. 병해충종합관리를 위해서는 우선 경제적피해수준과 단위 표본당 해충수를 결정하는 조사방법이 정립되어야 한다.

본 연구에서 수행한 제주지역 감귤재배에서 문제되고 있는 곽응애의 효율적인 표본조사법은 부(-)의 이항표본조사법이 가장 알맞은 것으로 나타났으며, 그 조사방법을 요약하면 Fig. 20과 같다. 곽응애의 밀도를 추정하기 위한 조사나무 및 잎의 선

정방법은 과수원 내에서 조사나무는 5a당 1주를 기준으로 선택하고, 조사잎은 나무의 바깥쪽에서 고르게 10개를 임의로 선정, 암컷 성충이 발생한 잎의 비율을 구하면 과수원의 잎당 평균밀도를 추정할 수 있다. 즉, 조사한 발생엽을 개발한 부(-)의 이항표본조사 모델에 적용하면 과수원의 잎당 평균밀도를 추정할 수 있을 뿐만 아니라 최대발생나무의 잎당 밀도 및 일정 밀도 이상으로 응애가 발생한 나무의 비율을 추정할 수 있다. 또한, 굴응애의 방제여부를 조사와 동시에 의사를 결정할 수 있는 의사결정 조건표를 작성하였는데(Table 23), 이 조건표를 이용하면 방제에 대한 의사결정은 2주를 조사했을 때부터 가능하였다. 그러나 의사결정을 했을 때 “방제”로 결정이 되면 농약 살포 등의 방제방법을 사용하면 되지만, “무방제”로 의사결정이 되는 경우 다음 조사시기를 결정하는 것이 중요하다. 이는 추정된 잎당 굴응애 평균밀도와 함께 온도별 경과일수에 따른 증식율 자료를 이용하면 조사시기를 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 굴응애의 증식률에 관한 자료는 국내에서 연구된 것은 없지만, 일본에서의 연구결과에 의하면 온도가 20℃에서 5일과 10일, 15일 후에 각각 1.72와 2.96, 5.09배였으며, 25℃에서는 각각 2.13과 4.55, 9.71배로 증가하는 것으로 보고되어 있다. 즉, 발생엽이 25%이었을 때, 추정된 잎당 평균밀도는 0.45마리가 되며, 평균온도가 20℃내외이면 다음 조사시기는 굴응애의 증식률을 적용하면 10일과 15일 후에는 각각 1.32와 2.27마리로 추정되기 때문에 13일 후에 재조사를 실시하면 된다. 그러나 온도가 25℃전후인 경우에는 5일 후에는 0.95마리, 10일 후에는 2.03마리로 추정되기 때문에 7일 후에 다시 조사해야한다.

굴응애의 경제적피해수준에 대해 명확히 규명되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 일반적으로 이용되고 있는 잎당 암컷 성충의 밀도가 2~3마리를 방제밀도로 하여 표본수 및 의사결정 프로그램을 작성할 수밖에 없었다. 그러나, 본 연구에서 개발된 감귤원에서의 굴응애 표본조사방법은 시급히 요청되고 있는 굴응애의 경제적 피해수준 결정에 이용될 수 있을 것으로 판단되며, 금후 경제적피해수준에 대한 연구가 이루어지고 이에 따른 방제밀도가 결정되어야 할 것이다. 또한, 본 연구의 결과는 감귤 병해충종합관리에서 중요한 부분을 차지하는 굴응애의 종합관리에도 적극적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

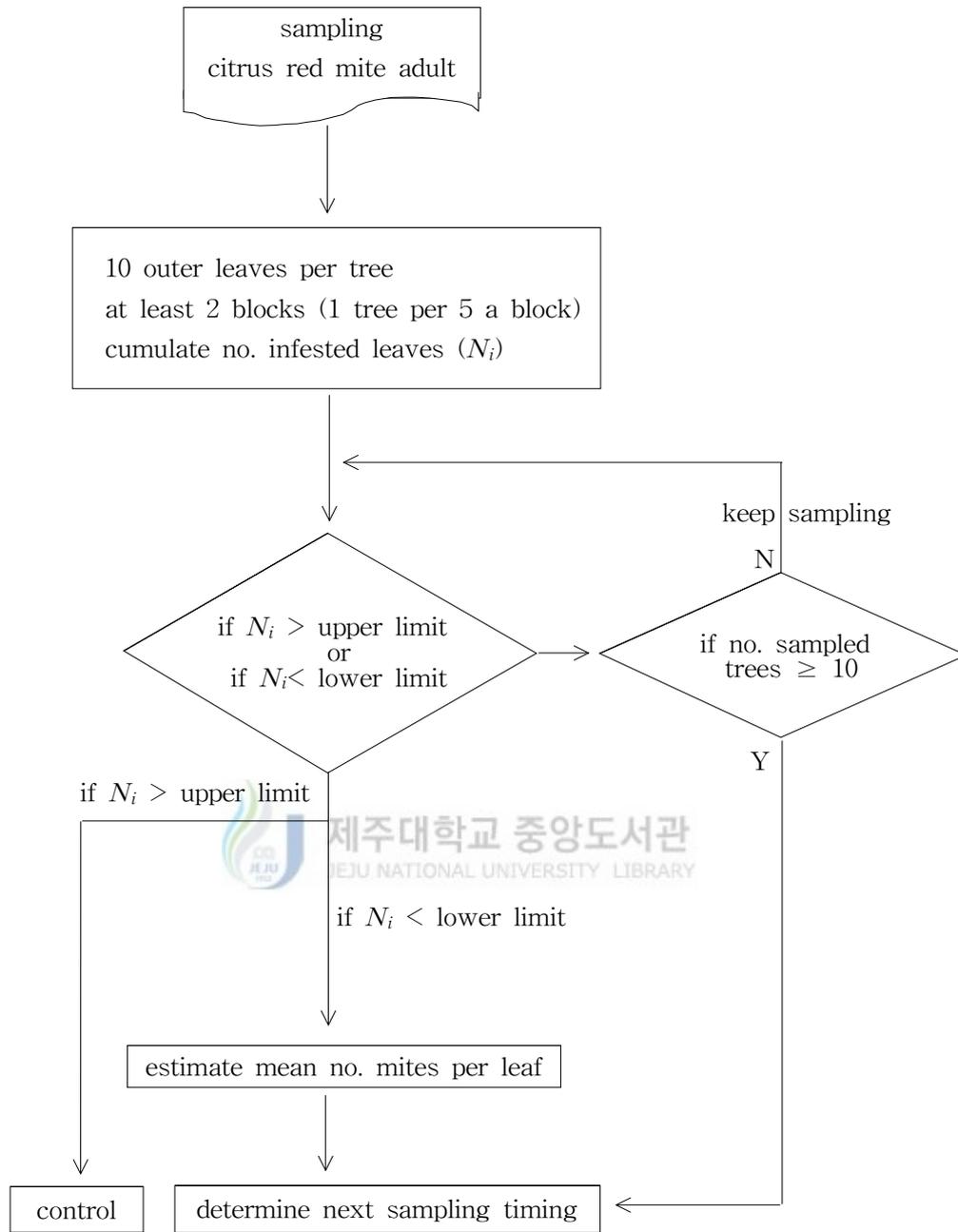


Fig. 20. Sampling scheme of citrus red mite adults in citrus groves

Table 23. The stop limits for decision-making citrus red mite population levels based on action thresholds of 1.0, 2.0 and 3.0 mites per leaf

No. trees sampled	Action thresholds(m_T) ^a					
	$m_T=1.0$		$m_T=2.0$		$m_T=3.0$	
	LL ^b	UL ^c	LL	UL	LL	UL
1	-	-	-	-	-	-
2	7	10	10	14	13	-
3	11	14	16	20	20	-
4	15	18	22	26	28	32
5	19	22	28	32	35	40
6	23	27	34	38	43	47
7	27	31	40	44	50	55
8	31	35	46	50	58	62
9	36	39	52	56	65	70
10	40	43	58	62	73	77
Stop sampling						



V. 인용문헌

- Argov, Y., Y. Rossler, H. Voet and D. Rosen. 1999. Spatial dispersion and sampling of citrus whitefly, *Dialeurodes citri*, for control decisions in a citrus orchard. *Agri. and Forest Entomol.* 1: 305~318.
- Asante, S.K., W. Danthanarayana and S.C. Cairns. 1993. Spatial and temporal distribution patterns of *Eriosoma lanigerum* (Homoptera: Aphididae) on apple. *Environ. Entomol.* 22: 1060~1065.
- Binns, M.R. and J.P. Nyrop. 1992. Sampling insect populations for the purpose of IPM decision making. *Annu. Rev. Entomol.* 37: 427~453.
- Binns M.R. and N.J. Bostanian. 1988. Binomial and censored sampling in estimation and decision making for the negative binomial distribution. *Biometrics.* 44: 473~483.
- Binns, M.R. and N.J. Bostanian. 1990. Robust binomial decision rules for integrated pest management based on negative binomial distribution. *Am. Entomol.* 36: 50~54.
- Bliss, C.I. 1958. The analysis of insect counts as negative binomial distributions. *Proc. X int. Mag.* 99: 48~49.
- Bliss, C.I. and A.R.G. Owen. 1958. Negative binomial distributions with a common k . *Biometrika* 45: 37~58.
- Bliss, C.I. and R.A. Fisher. 1953. Fitting the negative binomial distribution to biological data and note on the efficient fitting of the negative binomial. *Biometrics* 9: 176~200.
- Catling, H.D., S.C. Lee, D.K. Moon and H.S. Kim. 1977. Towards the integrated control of Korean citrus pests. *Entomophaga.* 22: 335~343.
- Childer, C.C and M.M. Abou-Setta. 1999. Yield reduction in 'Tahiti' lime from *Panonychus citri* feeding injury following different pesticide treatment regimes and impact on the associated predacious mites. *Exp. Appl. Acarol.* 23: 771~783.

- Cho K., S.H. Kang and G.S. Lee. 2000. Spatial distribution and sampling plans for *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae) infesting fall potato in Korea. J. Econ. Entomol. 93: 503~510.
- Choi, D.S. and K.C. Kim. 1998. Population fluctuation, developmental character of *Panonychus citri* and damage degree as its control density on young Yuzu (*Citrus junos*). Korean J. Appl. Entomol. 37: 193~198.
- Croft, B.A. and S.C. Hoyt. 1983. Integrated management of insect pests of pome and stone fruits. Wiley, New York. p. 454.
- 江原昭三, 眞梶徳純. 1996. 植物ダニ學. 全國農村教育協會. p. 81~84.
- Evans, D.A. 1953. Experimental evidence concerning contagious distributions in ecology. Biometrika 40: 186~211.
- Feng, M.G. and R.M. Nowierski. 1992. Variation in spatial patterns of the Russian wheat aphid (Homoptera: Aphididae) among small grains in the northwestern United States. Environ. Entomol. 21: 1029~1034.
- Flint, M.L. 1991. Integrated pest management for citrus (University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, no 3303). UC Regents. 2nd ed.
- Furuhashi, K. 1978. Economic threshold level of citrus red mite. Plant Protec. (in Japanese) 30: 335~340.
- Gerrard, D.J. and H.C. Chiang. 1970. Density estimation of corn rootworm egg populations based upon frequency of occurrence. Ecology 51: 231.
- Green, R.H. 1970. On fixed precision sequential sampling. Res. Popul. Ecol. 12: 249~251.
- Hall, D.G., C.C. Childers and J.E. Eger. 1994. Spatial dispersion and sampling of citrus rust mite (Acari: Eriophyidae) on fruit in 'Hamlin' and 'Valencia' orange groves in Florida. J. Econ. Entomol. 87: 687~698.
- Hall, D.G., C.C. Childers and J.E. Eger and J.C. Allen. 1997. Citrus rust mite (Acari: Eriophyidae) counts on fruit and the negative binomial distribution. Florida Entomol. 80: 1~10.

- Harcourt, D.G. 1966. Sequential sampling for the imported cabbage worm, *Pieris rapae* (L.). Canadian Entomol. 98: 741~746.
- Hare, J.D., J.E. Peherson, T. Clemens, J.A. Menge, C.W. jr. Coggins, T.W. Embleton and J.L. Meyer. 1992. Effect of citrus red mite (Acari: Tetranychidae) and cultural practices on total yield, fruit size, and crop value of 'navel' orange: year 3 and 4. J. Econ. Entomol. 85: 486~495.
- Hollingsworth, C.S. and R.E. Berry. 1982. Regression sampling plan for twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae) in Oregon peppermint. J. Econ. Entomol. 75: 497~500.
- Horn, D.J. 1988. Ecological Approach to Pest Management. Elsevier, London. p. 15~34.
- Hull, L.A. and E.H. Beers. 1990. Validation of injury thresholds for European red mite (Acari: Tetranychidae) on 'Yorking' and 'Delicious' apple. J. Econ. Entomol. 83: 2026~2031.
- 현재선. 1994. 농림해충학총론. 서울대학교 출판부. p. 325.
- 福田仁郎, 眞梶徳純. 1954. ミカンハダニの發育に及ぼす温湿度の影響. I. 卵の發育に及ぼす温湿度の影響. 東海近畿農試研報. 2: 160~171.
- Iwao, S. 1968. A new regression method for analyzing the aggregation pattern of animal population. Res. Popul. Ecol. (Kyoto) 10: 1~20.
- Iwao, S. and E. Kuno. 1971. An approach to the analysis of aggregation pattern in biological populations. p. 461~513. In G.P. Patiletal [ed.], Statistical Ecology. vol. 1. Penn. State Univ. Press.
- Jansson, R.K. and R. McSorley. 1990. Sampling plans for the sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae) on sweet potato in southern Florida. J. Econ. Entomol. 83: 1901~1906.
- Johnson, N.L. and S. Kotz. 1969. Discrete distributions. Houghton Mifflin Co., Boston. pp. 328.
- Jones, V.P. 1994. Sequential estimation and classification procedures for binomial

- counts. p. 175~205. In L. P. Pedigo and G. D. Buntin [eds.] Handbook of Sampling Methods for Arthropods in Agriculture. CRC. Boca Ralton, FL.
- Jones, V.P. and M.P. Parrella. 1984a. Dispersion Indices and sequential sampling plans for the citrus red mite (Acari: Tetranychidae). J. Econ. Entomol. 77: 75~79.
- Jones, V.P. and M.P. Parrella. 1984b. Intratree regression sampling plans for the citrus red mite (Acari: Tetranychidae) on lemons in southern California. J. Econ. Entomol. 77: 810~813.
- Kemp, A.W. 1987. Families of discrete distributions satisfying Taylor's power law. Biometrics 43: 881.
- Kennett, C.E. 1974. Spider mites, Citrus Pest Management Cooperative Extension Service, Univ. of California. p. 30.
- 김동환. 1997. 제주도내 귤응애의 발생생태에 관한 연구. 제주대학교 원예학과 석사학위논문.
- Kim, D.H., H.M. Kwon and K.S. Kim. 2000. Current status of the occurrence of the insect pests in the citrus orchard in Cheju island. Korean J. Appl. Entomol. 39: 267~274.
- Kim, H.S., D.Y. Moon, P.C. Lippold, Y.D. Chang, and J.S. Park. 1978. Studies on the integrated control of citrus pests. I. Bionomics of citrus red mite and natural enemies. Kor. J. Plant Prot. 7: 7~13.
- Kono, T. and T. Sugino. 1958. On the estimation of the density of rice stem borer. Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 2: 184~188.
- Kuno, E. 1986. Evaluation of statistical precision and design of efficient sampling for the population estimation based on frequency of occurrence. Res. popul. Ecol. (Kyoto) 28: 305~319.
- Lee, S.C., S.S. Kim and D.I. Kim. 1991. Ecological characteristics and control of *Phyllocnistis citrella* and *Panonychus citri* at the citron plantation. Res. Rept. RDA (Agri. institution cooperation). 34: 125~138.

- Lloyd, M. 1967. Mean crowding. *J. Anim. Ecol.* 36: 1~30.
- Lynch, R.E. and A.M. Simmons. 1993. Distribution of immatures and monitoring of adult sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae), in peanut, *Arachis hypogaea*. *Environ. Entomol.* 22: 375~380.
- Lysyk, T.J. and C.J. Sanders. 1987. A method for sampling endemic populations of the spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) based on proportion of empty sampling units. Information Report 0-X-382. Great Lakes Forestry Centre, Canadian Forestry Service.
- Margolies, D.C., E.P. Lambert and G.G. Kennedy. 1984. Sampling program for the twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae) in peanut. *J. Econ. Entomol.* 77: 1024~1028.
- Naranjo, S.E. and H.M. Flint. 1994. Spatial distribution of preimaginal *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in cotton and development of fixed-precision sequential sampling plans. *Environ. Entomol.* 23: 254~266.
- Naranjo, S.E., H.M. Flint and T.J. Henneberry. 1996. Binomial sampling plans for estimating and classifying population density of adult *Bemisia tabaci* in cotton. *Entomol. Exp. Appl.* 80: 343~353.
- Naranjo, S.E. and W.D. Hutchison. 1997. Validation of arthropod sampling plans using a resampling approach: Software and analysis. *Am. Entomol.* 43: 48~57.
- Nyrop, J.P. and M. Binns. 1991. Quantitative methods for designing and analyzing sampling program for use in pest management. pp. 67~132. *In* D. Pimentel [ed.], *Handbook of Pest Management in Agriculture*, vol. 2. CRC Boca Raton, FL.
- Nyrop, J.P., A.M. Agnello, J. Kovach and W.H. Reissig. 1989. Binomial sequential classification sampling plans for European red mite (Acari: Tetranychidae) with special reference to performance criteria. *J. Econ. Entomol.* 82: 482~490.
- Nyrop, J.P. and R.J. Wright. 1985. Use of double sample plans in insect

- sampling with reference to the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). Environ. Entomol. 14: 644~649.
- Nyrop, J.P., W.H. Reissig, A.M. Agnello and J. Kovach. 1990. Development and evaluation of a control decision rule for first-generation spotted tentiform leafminer (Lepidoptera: Gracillariidae) in New York apple orchards. Environ. Entomol. 19: 1624~1638.
- 眞梶徳純. 1959. ミカンハダニによる温州ミカンの被害. 農業よび園藝 47: 103~104.
- 眞梶徳純. 1959. ミカンハダニの發育に及温濕度の影響. II. 孵化以後の發育形態に及ぼす温濕度の影響. 東近畿農試研報 5: 129~142.
- 眞梶徳純. 1963. ミカンハダニの生息活動について. 園藝農試研報 1: 192~205.
- 大串龍一, 1976. ミカン果實の診断. 農山漁村文化協會. p. 56~57.
- Pena, J.E. and R.M. Baranowski. 1990. Dispersion indices and sampling plans for the broad mite (Acari: Tarsonemidae) and the citrus rust mite (Acari: Eriophyidae) on limes. Environ. Entomol. 19: 378~382.
- Peng, C. and G.J. Brewer. 1994. Spatial distribution of the red sunflower seed weevil (Coleoptera: Curculionidae) on sunflower. Environ. Entomol. 23: 1101~1105.
- Pieters, E.P. 1978. Bibliography of sequential sampling plans for insects. Bull. Entomol. Soc. Am. 24: 372.
- Pringle, K.L. and J.H. Giliomee. 1992. Dispersion statistics and sample size estimates for monitoring mite populations in commercial apple orchards. J. Appl. Ecol. 29: 143~149.
- Riel, L.A. 1978. Citrograph 1978. p. 175~176.
- Ruesink, W.G. 1980. Introduction to sampling theory. p. 61~78. In M. Morgan and D.C. Herzog [eds.], Sampling Methods in Soybean Entomology, Springer-Verlag, NY.
- Ruesink, W.G. and Kogan M. 1982. The quantitative basis of pest management: sampling and measuring. pp. 315~352 In R.L. Metcalf and W.H. Luckmann

- [eds.], Introduction to Insect Pest Management. Wiley, New York.
- Saguero-Navas, V.E., J.E. Funderburk, T.P. Mack, R.J. Beshear and S.M. Olson. 1994. Aggregation indices and sample size curves for binomial sampling of flower inhabiting *Frankliniella* spp. (Thysanoptera: Thripidae) on tomato. *J. Econ. Entomol.* 87: 1622~1626.
- Sanderson, J.P. and Z.Q. Zhang. 1995. Dispersion, sampling and potential for integrated control of twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae) on greenhouse roses. *J. Econ. Entomol.* 88: 343~351.
- SAS Institute. 1999. The SAS system for window. release 8.01. SAS institute Inc. Cary, NC 27513, USA.
- Sawyer, A.J. 1989. Inconsistency of Taylor's b' : simulated sampling with different quadrat sizes and spatial distribution. *Res. on Popul. Ecol.* 31: 11~24.
- Schaalje, G.B., R.A. Butts and T.J. Lysyk. 1991. Simulation studies of binomial sampling: A new variance estimator and density predictor, with special reference to russian wheat aphid (Homoptera: Aphididae). *J. Econ. Entomol.* 84: 140~147.
- Sevacherian, V, and V.M. Stern. 1972. Spatial distribution patterns of *Lygus* bugs in California cotton fields. *Environ. Entomol.* 1: 695~704.
- Shelton, A.M. and Trumble, J.T. 1991. Monitoring insect populations. pp. 45~62. *In* D. Pimentel [ed.], Handbook of Pest Management in Agriculture. vol. 2. CRC Boca Raton, FL.
- Shepard, M. 1980. Sequential sampling plans for soybean arthropods. pp. 79~93. *In* Handbook of Pest Management in Agriculture, eds. by M. Kogan and D.C. Herzog, Springer-Verlag, NY.
- 静岡縣經濟農業協同組合連合會. 1997. 柑橘病害蟲防除曆と指導要領. p. 19~23.
- Snedecor G.W. and W.G. Cochran. 1967. Statistical Methods, 6th ed. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, p. 593.
- Sokal, R.R. and F.J. Rohlf. 1981. Biometry. 2nd ed. Freeman. New York.

- Southwood, T.R.E. 1978. Ecological methods. 2nd ed. Chapman & Hall, London.
- Sterling, W.L. 1975. Sequential sampling of cotton insect populations. *In* Proceedings of the Beltwide Cotton Production and Research Conference. p. 133~135. National Cotton Council of America, Memphis, Tennessee.
- 田畑 前. 1972. ミカンハダニによる温州ミカンの被害. 農業および園藝. 47: 103~104.
- Taylor, L.R. 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature* 189: 732~755.
- Taylor, L.R. 1971. Aggregation as a species characteristic. pp. 357~377. *In* G.P. Patil, E.C. Pielou and W.E. Waters [eds.], Statistical ecology. Vol. 1. Penn. State Univ. Press, Philadelphia.
- Taylor, L.R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 321~357.
- Trumble, J.T. 1985. Implications of changes in arthropod distribution following chemical application. *Res. on Popul. Ecol. (kyoto).* 27: 277~285.
- Tasi, J.H., J.J. Wang and Y.H. Liu. 2000. Sampling of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae) on orange jessamine in southern Florida. *Florida Entomol.* 83: 446~459.
- Walker, P.W. and P.G. Allsopp. 1993. Sampling distributions and sequential sampling plans for *Eumargarodes laingi* and *Promargarodes* spp. (Hemiptera: Margarodidae) in Australian sugarcane. *Environ. Entomol.* 22: 10~15.
- Waters, W.E. 1995. Sequential sampling in forest insect surveys. *Forest Science* 1, p. 68~79
- Wilson, L.T. 1985. Estimating the abundance and impact of arthropod natural enemies in IPM systems. pp. 303~322. *In* M.A. Hoy and D.C. Herzog [eds.], Biological Control in Agricultural IPM Systems. Academic Press Inc. NY.
- Wilson, L.T. and P.M. Room. 1983. Clumping patterns of fruit and arthropods in cotton, with implications for binomial sampling. *Environ. Entomol.* 12: 50~54.
- 山田峻一, 西野 操. 1987. カンキツの病害蟲(第2版). 農文協. p. 220~226.

감사의 글

본 논문이 나오기까지 부족한 저에게 모든 과정을 마치고 결실을 맺을 수 있도록 아낌없는 배려와 가르침을 주시고 세밀하게 지도해주신 류기중 교수님께 감사를 드립니다.

바쁘신 가운데에도 심사를 맡아 격려와 충고, 논문 교정을 해주신 송관정 교수님, 이효연 교수님, 제주농업시험장 권혁모 과장님, 안동대학교 정철의 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 항상 관심과 배려로 모든 과정을 마칠 수 있도록 하여 주신 유장걸 교수님과 고정삼 교수님, 김찬식 교수님, 현해남 교수님, 강순선 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

이 논문이 나올 수 있도록 하여주시고 많은 지원을 해주신 제주도농업기술원 김광호 원장님, 김영문 국장님을 비롯한 모든 농업기술원 직원들에게 감사를 드리고, 시험수행에 도움을 준 이광석 담당, 오한준 연구사, 홍순영 연구사, 강상훈 연구사, 이창훈 연구사에게도 감사를 드립니다.

그리고 시험수행에 많은 도움을 주었던 작물보호연구실 김수남, 이미경님에게 감사를 드리며, 그동안 실험실에서 함께 생활했던 모든 분들에게도 감사를 전합니다.

오늘이 있기까지 항상 곁에서 애정 어린 마음으로 지켜봐 주시고 사랑으로 감싸 주신 부모님을 비롯한 형님 내외분과 어려움을 인내하며 사랑으로 내조해준 아내 오명애에게 고마움을 전하며, 사랑스러운 딸 민주, 듬직한 아들 성민, 승우와 함께 이 기쁨을 나눕니다. 그리고 먼 하늘나라에서 보고계신 장인, 장모님께 이 소고를 드립니다.

앞으로도 이 소고에 만족하지 않고 꾸준히 학문에 전념하여 올바른 인간이 되도록 노력하겠습니다. 항상 주변의 모든 이에게 감사하는 마음으로 살아가겠습니다.