

쌀 저장창고에서 어리쌀바구미와 화랑곡나방 밀도 추정을 위한 축차추출 조사법 (Sequential sampling plans) 개발

남영우 · 천용식 · 류문일*

고려대학교 생명과학대학 환경생태공학부

Developing Sequential Sampling Plans for Evaluating Maize Weevil and Indian Meal Moth Density in Rice Warehouse

Youngwoo Nam, Yong Shik Chun and Mun Il Ryou*

Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT : This paper presents sequential sampling plans for evaluating the pest density based on complete counts from probe in a rice storage warehouse. Both maize weevil and Indian meal moth population showed negative binomial dispersion patterns in brown rice storage. For cost-effective monitoring and action decision making system, sequential sampling plans by using the sequential probability ratio test (SPRT) were developed for the maize weevil and Indian meal moth in warehouses with 0.8 M/T storage bags. The action threshold for the two insect pests was estimated to 5 insects per kg, which was projected by a matrix model. The results show that, using SPRT methods, managers can make decisions using only 20 probe with a minimum risk of incorrect assessment.

KEY WORDS : Maize weevil, Indian meal moth, Sequential sampling plan, Pest management, SPRT

초 록 : 본 연구의 목적은 쌀 저장창고에서 추출기를 이용하여 해충의 밀도를 추정하기 위한 축차추출법을 개발하는데 있다. 쌀 저장창고에서는 쌀을 주로 1톤의 톤백에 저장하는데, 현미로 저장되는 경우 어리쌀바구미 성충과 화랑곡나방 유충은 모두 부의 이항분포를 보였다. 축차추출법은 표본 추출 단위당 방제 시작 밀도를 0.1(현미 1 kg당 5마리), 비처리 밀도를 0.05(현미 1 kg당 2.5마리) 그리고 I(α), II형(β) 오류를 0.3으로 설정하여 순차적 확률비 검정(sequential probability ratio test (SPRT))을 통해 개발하였다. 이러한 결과들은, SPRT법을 사용함으로써, 관리자들이 단지 20회의 표본 추출로도 잘못된 판단의 위험을 최소화하면서 의사결정을 할 수 있다는 것을 보여준다.

검색어 : 어리쌀바구미, 화랑곡나방, 축차추출법, 해충 관리, SPRT

어리쌀바구미와 화랑곡나방은 저장중 곡물에서 가장 큰 피해를 일으키는 관건 해충들이다. 어리쌀바구미 (*Sitophilus zeamais* (L.))는 범세계적으로 분포하면서 저

장곡물의 양적 손실은 물론 저장환경의 온도와 습도를 상승시켜 품질의 저하를 초래하고 저장곰팡이균에 의한 곡물의 부패와 곰팡이 독소(mycotoxin) 생성을 유도한다

*Corresponding author. E-mail: ryoomi@korea.ac.kr

(Tipples, 1995).

화랑곡나방(*Plodia interpunctella* (Hübner))은 남극대륙을 제외한 다른 모든 대륙에 분포하는 저장식품의 관건 해충이다(Rees, 2004; Hinton, 1943; Lecato, 1976; Storey *et al.*, 1983). 화랑곡나방에 의한 식품피해는 특히 유충의 경우에 많이 발생하는데, 여러 종류의 포장재질을 뚫고 들어갈 수 있고(Cline, 1978), 유충이 많은 양의 실크를 분비함으로써 저장 식품을 뭉치게 하여 처리공정을 방해하거나 소비자들로 하여금 혐오감을 느끼게 하는 등의 피해를 나타낸다(Rees, 2004). 화랑곡나방은 알레르기에 민감한 사람들에게서 천식, 알레르기성 비결막염, 피부병을 야기시킬 수 있는 알레르기성 물질을 수반할 수 있다(Binder *et al.*, 2001).

해충의 방제를 위해서 해충의 존재유무와 밀도를 정확히 파악할 필요가 있으며 이를 위해서 표본조사법이 개발되어야 한다(Subramanyam and Hagstrum, 1995). 지금까지 원에 해충에 대한 표본조사 방법은 확립되어왔으나(Hagstrum *et al.*, 1985; Hodges *et al.*, 1985; Subramanyam *et al.*, 1993) 저곡 해충의 표본조사법은 아직 초보적인 단계로(Subramanyam and Hagstrum, 1995) 표준화가 해충 종에 따라 부분적으로 이루어져 왔다(Subramanyam *et al.*, 1993; Subramanyam *et al.*, 1997).

표본조사의 한 방법인 축추출법은 해충의 밀도에 따라 표본의 수를 조정하는 방법으로 표본 단위의 수를 고정하여 평가하는 방법들에 비해서 비용이 적게 들며 밀도수준 결정이 빠르다는 장점이 있다(Waters, 1995). 실제로, 축추출법은 표본 단위의 수를 고정시켜 놓은 방법에 비해 40-60%의 보다 적은 표본수를 요구한다는 보고가 있다(Sterling, 1975). 저장해충의 밀도추정 및 관리를 위한 축추출법의 개발은 표본추출 비용을 낮출 수 있고, 아울러 불필요한 방제활동을 피함으로써 친환경적 해충 관리의 전제가 된다.

본 연구는 저장시설 내에서 해충의 밀도를 추정하기 위해 지금까지 제안된 방법들을 중심으로 그 타당도를 조사하고 이들을 변형하여 미곡종합처리장에서의 해충조사법을 확립하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

공시충

화랑곡나방은 1995년 여름 서울 소재 가정에서 보관하

던 현미에서 채집된 것으로 고려대학교 개체군 생태학 실험실에서 인공사료(쌀겨 800 g, yeast extract 200 g, glycerol 500 ml, methyl p-hydroxybenzoate 2 g, sorbic acid 2 g)로 $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 65~75%, 16:8 (L:D)의 광조건에서 누대사육된 계통이었다. 어리쌀바구미는 고려대학교 생명과학대학 개체군생태학 실험실에서 온도 $28 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 60-70%로 조정된 조건에서 현미(*Oryza sativa* L.)을 사료로 누대 사육되어 오고 있는 계통이다.

실험 시스템의 구성

쌀 저장 창고 주요해충의 밀도 추정 모델 개발을 위한 시스템을 확보하기 위해 상온인 10평의 공간에 현미 800 kg씩 들어있는 톤백 한 개를 넣어 시스템을 구성하였다. 톤백에 어리쌀바구미 50마리 접종하였고 화랑곡나방 성충 100쌍을 쌀저장고 내에 방사하였다. 그 후부터 매 10일마다 임의로 선택된 9개 지점에서 추출기(추출단위 20 g)로 표본을 30회 추출하였다. 추출 횟수에 따라 발견되는 화랑곡나방의 유충과 어리쌀바구미 성충 수를 조사하였고 추출된 쌀은 어리쌀바구미의 알이나 유충의 유무를 조사하기 위하여 상온에서 보관하였다. 아울러 전국적으로 벼재배 기후대별로 4개의 지역(김포, 안성, 천안, 남원)에 위치한 미곡종합처리장의 창고에서 위와 동일한 방법으로 2년간 실험을 수행하였다.

방제수준의 결정

쌀 저장고에서 발생하는 해충들에 의한 경제적 피해수준은 정확히 알려진 바가 없다. 이것은 해충에 의한 피해가 수량의 손실이 아닌 상품이 출하되었을 때, 해충이 존재유무에 대한 해당 상품의 리콜이 피해의 대부분의 유형이기 때문이다. 따라서 저장고내 해충의 방제수준은 해충 개체군의 밀도 증가를 유도하는 최저임계 밀도로 정하였다. 이를 위한 어리쌀바구미와 화랑곡나방 개체군의 동태를 모사하기 위해, 곤충 개체군 동태를 시뮬레이션 하는데 있어서 높은 유연성을 갖고 있는 것으로 알려져 있으며 개체군 동태를 모사하는데 있어서 적합한 층태구조 행렬모형(stage-structured matrix model)을 따랐고(Caswell, 2001), 화랑곡나방과 어리쌀바구미에 적합하게 수정한 모형과 시뮬레이션 하는데 필요한 계수값들은 Ji (2002)의 결과를 인용하였다. 어리쌀바구미는 자매종인 쌀바구미(*S. oryzae* L.)의 결과를 인용하였다. 이 시뮬레이션 결과, 두 해충 모두 초기밀도가 0.05/20 g일 때, 해충

개체군이 짧은 시간에 사멸하였으므로 관리를 하지 않아도 되는 임계밀도로 정하였고 초기밀도가 0.1/20 g일 때, 개체군이 사멸하나 보다 긴 시간 해충 개체군이 유지가 되고 이 밀도를 초과할 때 개체군이 대발생 가능성이 있으므로 방제를 시작하기 위한 임계밀도를 0.1/20 g으로 정하였다(Fig. 1).

축차추출법 계획

10일 간격으로 800 kg의 톤백에서 추출기를 통해 얻어진 전체 자료는 해충 개체군의 공간분포형을 결정하는데 토대가 되었다. 해충의 공간분포는 일반적으로 포아송분포(Poisson distribution)와 부의 이항분포(Negative binomial distribution)로 알려져 있으므로 각 조사시기별 자료에 대해 이 두가지 분포를 토대로 적합도 검정을 수행하였다. 적합도는 *G* test (Dunning 1993)으로 수행하였다. 축차추출 방식식은 Wald의 순차적 확률비 검정(Wald's sequential probability ratio test)을 통해 결정하였다(Wald, 1945, 1947; Fowler and Lynch, 1987; Bates *et al.*, 1991; Nault and Kennedy, 1996).

각각의 확률분포형을 토대로 표본 추출 단위당 방제 시작 밀도를 0.1 (현미 1 kg당 5마리), 비처리 밀도를 0.05 (현미 1 kg당 2.5마리) 그리고 I(α), II형(β) 오류를 0.3으로 설정하여 의사결정선을 구하였다(Table 2).

축차추출법의 검증

축차추출법을 검증하기 위해 검사특성곡선(operating characteristic curve)와 평균표본수곡선(average sample number curve)를 구하였다. 검사특성곡선은 해충을 관리하지 않도록 결정할 수 있는 확률을 나타낸다. 평균표본수곡선은 해충 밀도에 대해 의사결정을 하기 위해 요구되어지는 표본수를 나타낸다. 또한, 축차추출법이 표본수를 고정시켜 놓는 전통적인 표본조사법에 비해 얼마만큼의 효율을 갖는지를 확인하기 위해 벼재배 기후대별 4개 지역에서 얻어진 자료를 비교하였다.

결 과

생명표통계량을 기초로 하여 구축한 모형을 토대로 각 해충의 방제시작 밀도를 파악하기 위하여, 초기밀도를 달리하여 시뮬레이션한 결과, 화랑곡나방과 어리쌀바구미의 밀도는 현미 20 g당 0.1을 넘기 시작하면서 그 밀도가 크게 증가하기 시작하였다(Fig. 1). 그 이하의 밀도에서는 개체군이 시간이 지나면 소멸하였다. 이렇게 모형 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 토대로 방제시작밀도를 결정하였다.

축차추출법을 수행하기 위해, 표본추출을 통해서 얻어

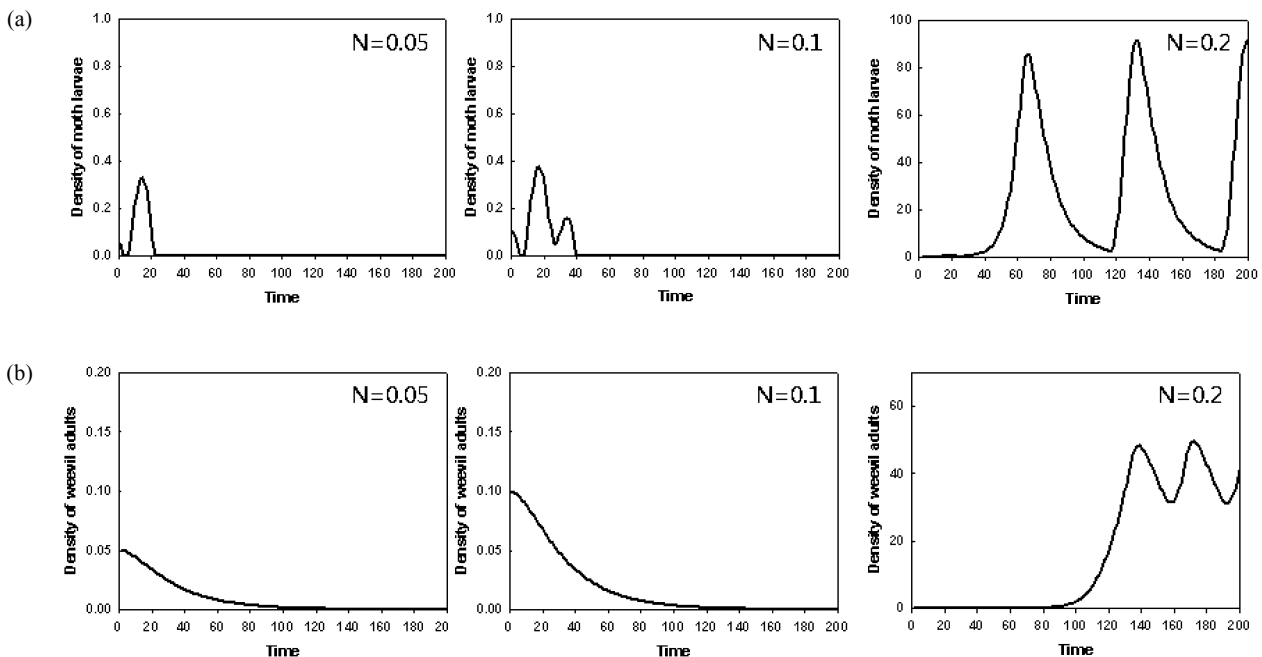


Fig. 1. Sequential change of Indian meal moth larvae (a) and maize weevil adults (b) followed by initial density.

진 현미와 조곡에서의 화랑곡나방과 어리쌀바구미의 개체수에 대한 확률분포가 어떤 확률분포를 따를 것인가에 대한 G test 결과, 현미에서 나방과 바구미가 부의 이항분포(negative binomial distribution)을 따른다는 것을 알 수 있었다(Table 1).

화랑곡나방에 대한 축차추출법의 의사결정경계선에서

임계밀도는 표본추출 단위 당 $\mu_0 = 0.05$ 이고 $\mu_1 = 0.1$ 로 가정하였다. 축차추출법의 의사결정 경계선의 기울기는 0.07이었고 절편은 아래쪽 경계선에 대해 $h_0 = -1.22$ 와 위쪽 경계선에 대해 $h_1 = 1.22$ 이었다. 나방 밀도를 토대로 관리를 하지않거나, 표본추출을 계속하거나, 관리를 시작하는 의사결정을 위한 최소로 요구되는 표본 수는 17회이

Table 1. Fitting test of negative binomial distribution pattern of Indian meal moth and maize weevil in brown rice ($p > 0.05$)

Indian meal moth				Maize weevil			
Average	k	$G_{calculated}$	d.f. ^a	Average	k	$G_{calculated}$	d.f.
1.57	3.99	5.04*	5	0.38	0.38	0.18*	1
0.80	0.14	3.11*	2	0.23	0.23	0.33*	1
3.33	6.74	2.53*	7	0.23	0.23	0.10*	1
4.67	5.65	5.07*	9	0.61	0.61	0.21*	2
3.40	6.17	2.06*	6	1.63	0.26	0.11*	1
3.77	16.94	4.07*	7	0.99	0.76	5.58*	2
3.20	3.68	4.09*	7	0.68	1.63	31.22 ^{ns}	3
3.37	3.21	5.29*	6	1.17	0.99	3.07*	2
2.47	2.94	6.29*	5	0.62	0.68	1.06*	2
4.20	3.30	5.28*	8	5.29	1.17	0.04*	1
4.20	3.30	5.28*	8	2.97	0.62	0.07*	1
3.47	1.49	6.22*	7	0.56	2.97	0.04*	1
4.07	9.79	4.96*	7	0.30	0.56	0.03*	2
3.03	1.10	8.68*	7	1.47	0.56	0.31*	1
4.33	0.93	10.37*	8	0.35	0.30	0.20*	1
3.63	2.70	2.90*	8	2.50	1.47	15.01 ^{ns}	2
1.57	0.92	1.06*	5	1.84	0.35	6.44 ^{ns}	2
1.43	0.84	3.56*	4	2.24	2.50	2.59*	2
2.80	0.80	9.72*	7	1.04	1.84	2.01*	2
4.10	0.98	13.05*	8	1.87	2.24	4.00*	2
3.87	1.03	8.06*	8	0.87	1.04	2.47*	3
3.43	0.79	16.06 ^{ns}	6	3.04	1.87	2.63*	3
4.52	1.51	8.72*	8	1.02	0.87	1.10*	3
3.57	1.40	14.64*	8	1.95	3.04	0.73*	4
3.50	1.44	12.94*	8	10.79	1.02	0.50*	4
4.37	1.47	8.21*	7	1.65	1.95	0.16*	3
3.13	1.97	11.48*	9	4.78	1.65	1.30*	3
4.43	1.06	3.75*	8	2.14	2.14	2.59*	3
4.90	1.43	5.08*	9	2.02	2.02	1.92*	3
4.03	2.49	7.11*	9	4.51	4.51	1.08*	3
4.57	1.24	7.85*	9	2.73	2.73	0.96*	3
4.47	2.80	4.44*	9	9.76	1.84	0.46*	3
4.03	1.11	14.67*	9	1.84	9.76	3.14*	3
k_{common}		0.4315				1.502	

^aDegrees of freedom; *Significant at 5% probability; ^{ns}Non-significant at 5% probability

Table 2. Formulae for computing stop boundaries for a SPRT based on Poisson, negative binomial distributions

Distribution and parameters	Low intercept (h_0)	High intercept (h_1)	Slope (S)
Negative binomial; μ_0 and μ_1, k	$\frac{\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{\mu_1(\mu_0+k)}{\mu_0(\mu_1+k)}\right)}$	$\frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{\mu_1(\mu_0+k)}{\mu_0(\mu_1+k)}\right)}$	$\frac{\ln\left(\frac{\mu_1+k}{\mu_0+k}\right)}{\ln\left(\frac{\mu_1(\mu_0+k)}{\mu_0(\mu_1+k)}\right)}$

μ_0 : lower decision level μ_1 : upper decision level k : constant of negative binomial α : type I error β : type II error

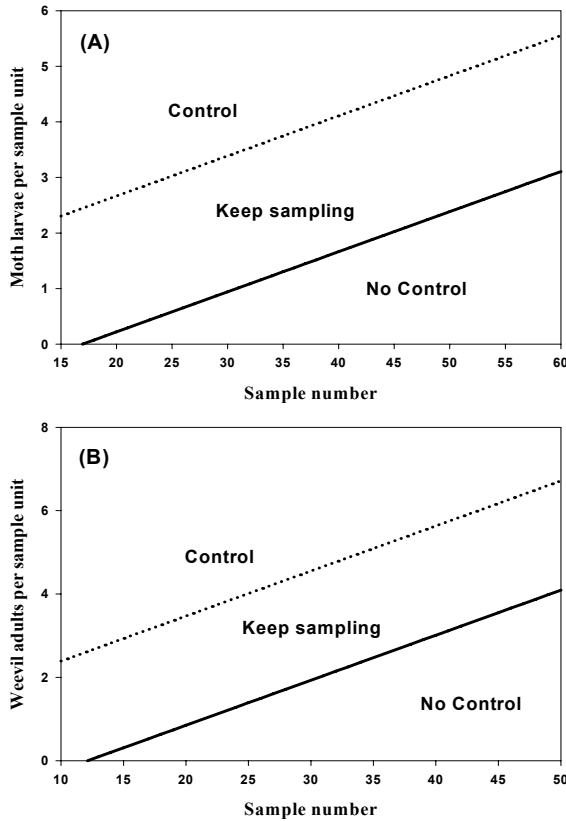


Fig. 2. Decision boundaries of the sequential sampling plan for Indian meal moth larvae (a) and maize weevil adults (b) in storage tonbag.

었다(Fig. 2a).

어리쌀바구미에 대한 축차추출법의 의사결정경계선에서 임계밀도는 표본추출 단위 당 $\mu_0 = 0.05$ 이고 $\mu_1 = 0.1$ 로 가정하였다. 축차추출법의 의사결정 경계선의 기울기는 0.03이었고 절편은 아래쪽 경계선에 대해 $h_0 = -1.31$ 와 위쪽 경계선에 대해 $h_1 = 1.31$ 이었다. 바구미 밀도를 토대로 관리를 하지않거나, 표본추출을 계속하거나, 관리를 시작하는 의사결정을 위한 최소로 요구되는 표본 수는 13회이었다(Fig. 2b).

의사결정경계선의 그래프는 3부분으로 나뉘게 되는데 실선 위의 부분은 방제를 시작하여야 하는 지점이고 실선

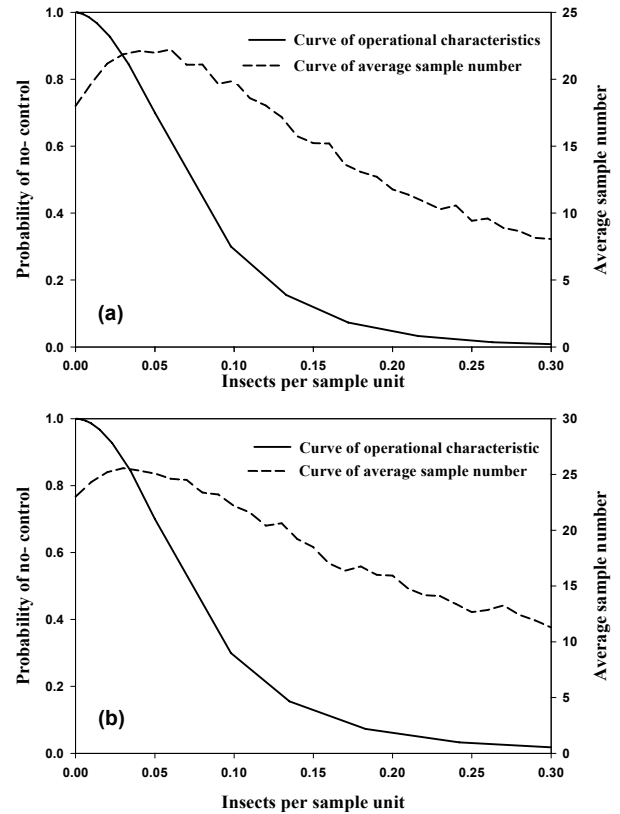


Fig. 3. Curves of operational characteristics and average sample number for the sampling of Indian meal moth larvae (a) and maize weevil adults (b) in storage tonbag.

과 점선 사이의 부분은 표본 추출을 계속하여야하는 지점이며, 점선 아래부분은 아무런 처리도 하지 않아도 되는 부분이다(Fig. 2).

화랑곡나방 유충의 밀도가 아래쪽 경계선의 임계 밀도와 근접했을 때(표본추출 단위당 0.05마리), 표본추출을 중단하고 방제를 하지 않아도 되는 결정을 위해 요구되는 표본추출수는 22회였다. 대조적으로 위쪽 경계선의 임계 밀도(표본추출 단위당 0.1마리)에 근접했을 때, 표본추출을 중단하고 방제를 하지 않아도 되는 결정을 위해 요구되는 표본추출수는 19회였다. 그리고 화랑곡나방 유충의 밀도가 크게 증가할 수 있는 밀도(표본추출 단위당 0.2마

Table 3. Validation of the sequential sampling plans for Indian meal moth and maize weevil as a function of the decision reached using conventional sampling plans in 4 localities

Localities	Mean no. of Indian meal moth per 1 kg		Number of samples		Decision-making		Economy (%)*
	Conventional plan	Sequential plan	Conventional plan	Sequential plan	Conventional plan	Sequential plan	
Gimpo	0.50	0.54	30	17	No-control	No-control	43.33
Anseong	0.49	0.54	30	17	No-control	No-control	43.33
Cheonan	0.55	0.57	30	17	No-control	No-control	43.33
Namwon	0.47	0.43	30	17	No-control	No-control	43.33

Localities	Mean no. of maize weevil per 1 kg		Number of samples		Decision-making		Economy (%)
	Conventional plan	Sequential plan	Conventional plan	Sequential plan	Conventional plan	Sequential plan	
Gimpo	1.57	1.42	30	13	No-control	No-control	56.67
Anseong	1.52	1.62	30	13	No-control	No-control	56.57
Cheonan	6.22	6.12	30	13	Control	Control	56.67
Namwon	1.59	1.59	30	13	No-control	No-control	56.57

*1-(No. of samples at Conventional plan/No. of samples at sequential plan)

리)일 때에는 12회의 표본추출만이 요구되어졌다. 화랑곡나방 유충의 밀도가 아래쪽 경계선의 임계밀도(표본추출 단위당 0.05마리)에 근접했을 때, 방제를 하지 않도록 결정하기 위한 확률은 70%였다. 그러나 위쪽 경계선의 임계 밀도(표본추출 단위당 0.1마리)보다 높은 밀도에 대해서는 방제를 하지 않아도 되기 위한 확률이 50%보다 낮았다. 그리고 화랑곡나방 유충의 밀도가 크게 증가할 수 있는 밀도(표본추출 단위당 0.2마리)일 때에는 방제를 하지 않아도 되는 확률이 10% 미만이었다(Fig. 3a).

어리쌀바구미 성충의 밀도가 아래쪽 경계선의 임계 밀도와 근접했을 때(표본추출 단위당 0.05마리), 표본추출을 중단하고 방제를 하지 않아도 되는 결정을 위해 요구되는 표본추출수는 25회였다. 이와는 대조적으로 위쪽 경계선의 임계밀도(표본추출 단위당 0.1마리)에 근접했을 때, 표본추출을 중단하고 방제를 하지 않아도 되는 결정을 위해 요구되는 표본추출수는 22회였다. 만약 어리쌀바구미 성충의 밀도가 크게 증가할 수 있는 밀도(표본추출 단위당 0.2마리)일 때에는 16회의 표본추출만이 요구되어졌다. 어리쌀바구미 성충의 밀도가 아래쪽 경계선의 임계밀도(표본추출 단위당 0.05마리)에 근접했을 때, 방제를 하지 않도록 결정하기 위한 확률은 72%였다. 대조적으로, 위쪽 경계선의 임계밀도(표본추출 단위당 0.1마리)보다 높은 밀도에 대해서는 방제를 하지 않아도 되기 위한 확률이 50%보다 낮았다. 어리쌀바구미의 밀도가 크게 증가할

수 있는 밀도(표본추출 단위당 0.2마리)일 때에는 방제를 하지 않아도 되는 확률이 10% 미만이었다(Fig. 3b).

벼재배 지대별 4지역에서 표본수가 고정된 전통적인 표본조사법을 통한 의사결정 결과는 축차추출법을 통해 얻어진 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다(Table 3). 이 두 표본조사법을 통해 얻어진 의사결정은 축차추출법을 사용하였을 때, 보다 적은 표본수가 요구되었다(화랑곡나방의 경우 17회, 어리쌀바구미의 경우 13회). 이 결과는 축차추출법을 시행하였을 때, 43.33%에서 최고 56.67%의 표본수를 낮출 수 있는 것을 의미한다.

고 찰

화랑곡나방과 어리쌀바구미 모두 현미를 가해하지만, 가해하는 양상은 다르다. 화랑곡나방의 유충은 현미의 배아와 현미질을 갉아먹는데 반해, 어리쌀바구미의 경우에는 성충에 의한 섭식뿐만 아니라, 현미 내부에 산란함으로써 유충이 현미를 가해한다. 이러한 가해양상의 차이로 인해 피해정도가 다르게 된다. 미곡종합처리장에서 도정 과정을 거치면서 여러 불순물들이 제거되어지는데 이 과정에서 화랑곡나방 유충과 어리쌀바구미 성충은 거의 제거되어진다. 그러나 어리쌀바구미의 알과 유충은 쌀 내부에 존재하므로 도정 후 최종상품으로까지 도달할 가능성

이 높아 더 많은 해충 문제를 야기할 수 있다. 그러므로 피해를 일으킬 수 있는 잠재력이 화랑곡나방보다는 어리쌀바구미가 더 크기 때문에 미곡종합처리장에서 어리쌀바구미 밀도의 추정이 더 중요하다.

Davis (1994)는 대상 해충이 수학적으로 부의이항분포를 보인다면 적어도 최소 30번의 표본 단위가 요구된다고 보고 하였다. 그러나 Subramanyam *et al.* (1997)와 Toews *et al.* (2003)은 축차추출법을 통해 표본수를 줄일 수 있다는 결과를 보고하였고 본 실험의 결과 또한 순차확률비검정을 사용함으로써, 화랑곡나방과 어리쌀바구미 모두 46.67%에서 66.67% 정도의 표본추출수를 감소시키면서도 합리적인 의사결정을 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

저장해충에 대한 종합적 해충 관리 프로그램(IPM)의 성공은 방제결정을 위한, 표본수를 최소화하고 그 결과로, 시간과 노력을 절약할 수 있는 축차추출법의 사용이 전제가 되며 이 점에서 본 연구에서 얻어진 결과는 어리쌀바구미와 화랑곡나방의 관리에 토대가 될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업특정연구개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Bates, B.A., M.J. Weiss, R.B. Carlson and D.K. McBride 1991. Sequential sampling plan for *Limothrips denticornis* (Thysanoptera: Thripidae) on spring barley. *Econ. Entomol.* 84: 1630-1634.
- Caswell, H. 2001. *Matrix Population Models, Construction, Analysis, and Interpretation*, 2nd Ed. Sinauer, Sunderland MA.
- Davis, P.M. 1994. Statistics for describing populations. In: Pedigo, L.P., Buntin, G.D. (Eds.), *CRC Handbook of Sampling Methods for Arthropods in Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 33-54.
- Dunning, T.. 1993. Accurate Methods for the Statistics of Surprise and Coincidence. *Computational Linguistics*. 19(1): 61-74.
- Fowler, G.W. and A.M. Lynch 1987. Sampling plans in insect pest management based on Wald's sequential probability ratio test. *Environ. Entomol.* 16: 345-354.
- Hagstrum, D.W., G.A. Milliken and M.S. Waddell. 1985. Insect distribution in bulk-stored wheat in relation to detection or estimation of abundance. *Environ. Entomol.* 14: 655-661.
- Hodges, R.J., H. Halid, D.P. Rees, J. Meik and J. Sarjono. 1985. Insect traps tested as an aid to pest management in milled rice stores. *Stored Prod. Res.* 21: 215-219.
- Ji, J. 2002. Influence of two specialized parasitoids on the inter-specific competition between rice weevil and Indian meal moth on brown rice. Thesis for the degree of master of science. Korea University. pp. 10-32.
- Nault, B.A. and G.G. Kennedy. 1996. Sequential sampling plans for use in timing insecticide applications for control of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) in potato. *Econ. Entomol.* 89: 1468-1476.
- Pedigo, L.P., G.D. Butin and E.J. Bechinski. 1982. Flushing technique and sequential-count plan for Green cloverworm (Lepidoptera: Noctuidae) moths in soybeans. *Environ. Entomol.* 11: 1223-1228.
- Ruesink, W.G. and M. Kogan. 1982. The quantitative basis of pest management: sampling and measuring. In *Introduction to Insect Pest Management*. R.L. Metcalf and W.H. Luckmann (eds.), pp. 315-352. Wiley, New York.
- Sterling, W.L. 1975. Sequential sampling of cotton insect populations. In *Proceedings of the Beltwide Cotton Production and Research Conference*, pp. 133-135. National Cotton Council of America, Memphis, Tennessee.
- Subramanyam, B.H. and D.W. Hagstrum and T.C. Schenk. 1993. Sampling adult beetles associated with stored grain: Comparing detection and mean trap catch efficiency of two types of probe traps. *Environ. Entomol.* 22: 33-42.
- Subramanyam, B.H. and D.W. Hagstrum. 1995. Sampling, pp. 135-193. In *Integrated Management of Insects in Stored Products*. Subramanyam, B.H., and D. W. Hagstrum. (eds.), Marcel Dekker, Inc., New York.
- Subramanyam, B.H., D.W. Hagstrum, R.L. Meagher, E.C. Burkness, W.D. Hutchison and S.E. Naranjo. 1997. Development and evaluation of sequential sampling plans for *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Cucujidae) infesting farm-stored wheat. *Stored Prod. Res.* 33: 321-329.
- Toews, M., B.H. Subramanyam and R. Roesli. 2003. Development and validation of sequential sampling plans for Sitophilus species associated with pet speciality stores. In: Credland, P.F., Armitage, D.M., Bell, C.H., Cogan, P.M., Highley, E. (Eds.), *Advances in Stored Product Protection*. Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection, 22-26 July. CABI International, New York, UK, pp. 115-120.
- Wald, A. 1945. Sequential test of statistical hypotheses. *Ann. Math. Stat.* 16: 117-186.
- Waters, W.E. 1955. Sequential sampling in forest insect surveys. *Forest Sci.* 1: 68-79.

(Received for publication October 27 2008;
revised January 7 2009; accepted January 10 2009)