

인위적 구속환경에서 솔수염하늘소의 쓸기와 탈출행동: 성충탈출 방지용 그물망의 생물검정법 제안

고경훈 · 김동순^{1*}제주대학교 생명자원과학대학 식물환경전공, ¹제주대학교 아열대농업생명과학연구소

Gnawing and Escaping Behaviors of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in a Confined Environment: Suggesting a Bioassay Method of Netting for Adult Escape Prevention

Gyeong hun Ko and Dong-Soon Kim^{1*}

Majors in Plant Resource Sciences & Environment, College of Applied Life Science, SARI, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

¹The Research Institute for Subtropical Agriculture and Biotechnology, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

ABSTRACT: The Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope, is a representative vector of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, which causes wilting symptoms in pine trees. A control method using a net has been introduced, which is an alternative method to the fumigation for the control of dead pine trees by pine wilt disease. This study was carried out to investigate the factors that induce gnawing and escaping behaviors of *M. alternatus*. The behaviors were examined after *M. alternatus* adult was placed in a confined space at different temperatures. *M. alternatus* adults could escape through mesh net torn by gnawing when they were confined in a space of 30 mm or less in diameter. The success rate of escape was high at 20 to 30 °C, and no adults escaped at 15 °C. The enticement of *M. alternatus* adults by food didn't affect the success rate of escape. In the case of not being confined in a narrow space, the escaping hole could not be formed because the gnawing was not concentrated on one part. *M. alternatus* moved its body in a narrow space using the tarsus of middle and hind legs, and made an escape hole by concentrically gnawing the obstacle on the front side with mandible, and showed a behavior of getting out while supporting the body by supporting the front legs. The present results will be able to use as an important basic information for evaluating the performance of mesh net which confines *M. alternatus* adults and suggested by alternative method to fumigation technology.

Key words: Pine wilt disease, Pine tree, Tensile strength, Tear strength, Pupal chamber

초 록: 솔수염하늘소는 소나무에 시들음 증상을 유발하여 괴사시키는 소나무재선충을 매개하는 대표적 매개충이다. 소나무재선충병 고사목 방제 살충처리 방법으로 훈증방법을 대체할 수 있는 그물망을 이용한 방제법이 도입되고 있다. 본 연구는 솔수염하늘소의 쓸기와 탈출 행동을 유발시키는 조건을 구명하기 위하여 구속 공간 및 온도를 달리 처리하고 탈출여부를 조사하였다. 솔수염하늘소는 직경 30 mm 이하의 공간에 구속되었을 때 장애물을 뚫고 탈출이 가능하였다. 온도 15°C에서는 탈출이 성공하지 못하였으며, 20~30°C 범위에서 탈출 성공률이 높았다. 먹이를 이용한 솔수염하늘소의 유인은 탈출 성공률에 영향을 미치지 않았다. 좁은 공간에 구속되지 않는 경우는 갑은 부위가 집중되지 않아 탈출공을 형성하지 못하였다. 구속된 공간에서 솔수염하늘소는 가운데와 뒷다리 부절을 이용해 좁은 공간에서 몸을 이동시키며 큰턱으로 정면에 있는 장애물을 집중적으로 갉아서 탈출공을 만들고 앞다리를 뺀어 몸을 지탱하면서 빠져나오는 행동을 보였다. 본 연구의 결과는 훈증 대체기술로 제시되고 있는 구속 그물망의 성능을 평가하는데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

검색어: 소나무재선충병, 소나무, 인장강도, 인열강도, 변태기방

*Corresponding author: dongsoonkim@jejunu.ac.kr

Received April 25 2017; Revised May 15 2017

Accepted May 15 2017

솔수염하늘소는(*Monochamus alternatus*)은 해송수염치레 하늘소라고도 불리며 한국, 중국, 일본, 대만 등에 서식(Kishi, 1995)하는 딱정벌레목 하늘소과 곤충으로 소나무류 식물을 기주로 하여 수피를 갉아먹으며 살고 소나무류 수피의 목질부에 알을 낳아 번식하는 천공성 해충이다. 이 해충은 소나무류의 물관을 막아 시들게 하여 수개월 내에 소나무를 고사시키는 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)의 대표적인 매개충이다(Kishi, 1988; Edwards and Linit, 1992). 제주도과 남부지방에 서식하는 소나무의 상당수가 솔수염하늘소를 통해 매개된 소나무재선충에 의해 고사되었다(JSSG, 2014).

소나무재선충병의 확산 방지를 위하여 매개충인 솔수염하늘소를 우선적으로 방제하는 것으로 초점이 맞추어졌는데(KFS, 2003), 소나무 고사목을 벌채하여 내부의 유충을 훈증약제로 사멸시키는 방법이 가장 널리 사용되고 있다(KFS, 2016). 훈증방법은 고사목을 토양위에 적재하여 피복제(타포린 천막)로 덮어 밀봉하고 메타소듐 등 훈증제(Lee et al., 2003)를 처리하는 방법이다. 그러나 이러한 훈증 방법은 환기가 되지 않은 상황에서 소독약제가 배출되지 않고 봉인 기간이 길기 때문에 무심코 훈증막을 열어 보았거나 훼손한 사람들에게 피해가 갈 수 있다(Kim, 2007)는 문제가 꾸준히 제기 되었다. 또한 메타소듐의 분해산물인 맹독성의 MIC (Methyl isocyanate)가 방출될 수 있다는 결과가 외국에서 보고되었다(Woodrow et al., 2014). 국립산림과학원에 의하여 MIC의 방출량이 노출허용기준 이하의 극미량인 것으로 밝혀졌으나(Reviewed in JSSGP, 2016), 훈증과 같은 환경에 피해를 줄 수 있는 화학적인 처리방법을 줄일 수 있는 대체방법은 꾸준히 요구되고 있다. 특히, 제주도는 화산회토라는 토질의 특성상 피복막으로 훈증약제의 밀봉이 쉽지 않고 지하수의 오염유발 가능성이 크기 때문에 대체 방법의 개발이 절실히 요구된다.

현재 훈증 대체방법으로 파쇄, 소각, 매몰, 박피 및 그물망 피복 등 다양한 방법이 제시되고 있다(JSSGP, 2016; KFS, 2016). 이 중 그물망 피복은 고사목을 처리하는데 있어 다른 곳으로 운반하기 불가능한 장소에서 적용할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 파쇄, 소각, 매몰, 박피 등 방법은 소나무 고사목 내부에 있는 매개충의 알, 유충 및 번데기 등을 발육단계를 직접 제거하는 것이기 때문에 성충의 발생 가능성이 아예 없다. 그러나 그물망 피복은 고사목을 솔수염하늘소 성충이 뚫고 탈출할 수 없는 정도의 강한 망으로 피복하여 우화 후 후식 및 분산(이동)을 억제하는 방법이다. 따라서 솔수염하늘소 성충의 힘으로 그물망이 뚫리는 경우 효과적인 방제를 기대할 없다.

솔수염하늘소는 다 자란 유충이 나무 내부에 번데기방(pupal chamber)을 만들고 번데기로 된 다음 성충으로 우화하

여 단단한 목질부를 뚫고 밖으로 탈출한다(Chung et al., 2003). 따라서 방제에 사용되는 그물망은 솔수염하늘소 성충이 뚫고 탈출할 수 없을 만큼 튼튼해야 한다. 성충의 탈출구 부분과 밀착하고 있는 부위는 쉽게 뚫릴 수 있으므로 생물검정을 통해 입증된 규격의 그물망이 사용되어야 할 것이다. 하지만, 아직까지 솔수염하늘소의 행동양식을 고려한 그물망 평가 생물검정법이 수립되어 있지 않으며, 정확한 평가 없이 인장강도 1,500 N과 인장길이 42 mm를 단순히 제시하고 있다(KFS, 2016).

따라서 본 연구는 솔수염하늘소의 쓸기(갉기)와 탈출행동을 유발하는 조건을 구명하여 그물망 성능(강도)의 생물검정을 위한 표준조건을 제시하고자 수행하였다. 성충 탈출전 직면하는 번데기방과 유사한 공간적 구속조건을 조성하여 평가하였으며, 온도조건이 탈출 성공에 미치는 영향 등을 구명하였다. 쥐가 좁은 공간에 구속되었을 때 탈출을 위한 쓸기(갉기)행동이 유발된다는 점을 이용하여 근육활동, 피로 및 스트레스 등에 대한 약물반응을 평가하는 생물검정법이 제시된 바 있다(Ayada et al., 2002). 곤충의 탈출행동은 기존의 알려진 사실과는 달리 대뇌에서 시업을 포함한 신경회로의 복잡한 반응으로써 유도된다는 사실이 밝혀지고 있다(Card, 2012). 이렇게 동물의 행동 특성을 이해하여 특수한 생물검정법을 수립하는 것은 생물학적으로 타당하다고 생각된다.

재료 및 방법

실험곤충

본 연구에 사용된 개체는 제주대학교 아라동 캠퍼스 농장, 제주시 오동동 한라산CC, 제주도립 한라생태숲에 각각 설치한 우화상(그물망 또는 간이 철재 우화상)에서 2016년 6월부터 8월까지 주 3회 수거하여 얻었다. 각 우화상은 제주도 제주시 애월읍 각지의 소나무재선충 고사목 임시처리장에서 솔수염하늘소 유충의 섭식 흔적이 있는 고사목을 채취하여 2016년 3월 중순 적재하였다. 우화상에 적재할 때 기계톱으로 고사목을 1 m 내외의 길이로 절단하여 처리하였다(Kim, 2003). 우화상에서 수거된 솔수염하늘소는 이물질과 응에 등의 기생충을 제거하기 위해 증류수로 세척 후 사육실(25 ± 1 °C, RH > 50%)의 아크릴 케이지(30×60×30 cm)에서 사육되었다. 주 2회 충분한 양의 소나무 싹초를 물을 1/2 채운 비이커에 꽂아서 공급해 주었다.

솔수염하늘소의 쓸기와 탈출행동

쓸기와 탈출행동을 유발하는 공간적 구속조건 구명. 솔수염

하늘소의 특정행동을 유발시키는 공간적 구속조건을 조성하기 위하여 직경 25, 30, 45, 50 mm가 되는 투명 아크릴 파이프를 각각 60 mm로 잘라서 준비하였다. 그리고 한쪽 입구를 폴리프로필렌 망사천(see Table 1 for the details)으로 덮어 차단하고 반대편 입구로 하늘소 성충의 머리가 망을 향하도록 투입하였다. 그 다음 투입구를 아크릴판으로 막고 테이프로 봉인하였다. 직경 15 mm의 처리는 투명 코니컬 튜브(용량 5 ml, 직경 16 mm, 내직경 14.5 mm, 길이 60 mm; Stockwell® Korea)의 말단부(길이 10 mm)를 잘라내어 사용하였다(Fig. 1A). 성충이 망사천과 접촉할 수 있도록 아크릴 파이프를 지면에서 약 15도 경사지게 설치하였다. 또한 솔수염하늘소가 다리로 파이프의 벽을 지탱하여 힘을 집중할 수 있도록 파이프 벽에 구멍(≈ 10 mm 간격)을 뚫어 착지점을 제공하였다. 각 직경별 7마리를 반복하였으며, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h에 탈출 성공여부와 탈출하지 못하고 사망한 개체수를 조사하였다. 실험에 이용한 개체는 우화 후 30일 이내 이었다(암수는 구분하지 않았음).

먹이 유인물 존재 여부에 따른 탈출 성공률. 먹이 유인물질

의 존재여부가 솔수염하늘소의 탈출행동에 영향을 미치는지 구명하기 위하여 구속공간과 먹이조건을 조합처리하여 탈출성공률을 조사하였다. 직경 15 mm 구속공간은 위에서 사용한 코니컬 튜브 실험장치 2개를 망사천(폴리프로필렌 망사천)을 사이로 맞대어 조성하였다(Fig. 1B). 한쪽 튜브에 솔수염하늘소를 투입하고 다른 한 쪽에는 소나무 싹초를 제공하거나 비어두었다. 행동적 구속이 크게 영향을 미치지 않는 구속조건은 직경이 70×70 mm, 길이 140 mm 사각 아크릴 통을 두 개 맞대어 마련하였다. 이 경우에도 중간을 폴리프로필렌 망사천으로 격리하였으며, 먹이 제공 여부에 따라 탈출여부를 조사하였다. 실험은 솔수염하늘소 성충사육페이지에서 무작위로 성충을 채취하여 사용하였고, 25°C 조건에서 처리 후 12, 24, 36, 48시간에 조사하였다.

솔수염하늘소의 쫓기와 탈출 행동양식 구명. 솔수염하늘소를 위 15 mm 구속환경에 처리하고 망사를 감고 탈출하는 행동을 관찰하였다. 행동의 전 과정을 비디오 카메라(SONY HDR-PJ660, Japan)로 촬영하여 일련의 행동을 육안으로 분석하였

Table 1. Tensile, tear strength (N per cm) and lattice distance of two mesh-cloth in longitudinal and transversal direction and thickness of mesh

Tested items		Type of mesh		Unit	Certified reference
		Polypropylene	Nylon		
Tensile strength	Longitudinal	48.4	40.6	N/cm	KS K ISO 10319:2011
	Transversal	39.8	71.2		
Tear Strength	Longitudinal	61.8	46.4	N/cm	KS K 0796:2011
	Transversal	32.1	93.0		
Lattice distance	Longitudinal	0.35 & 0.20	0.32	mm	
	Transversal	0.20	0.25		
Thickness	Longitudinal & Transversal	0.10	0.175	mm	

The official test was conducted by the Korea Apparel Testing & Research Institute (KATRI).

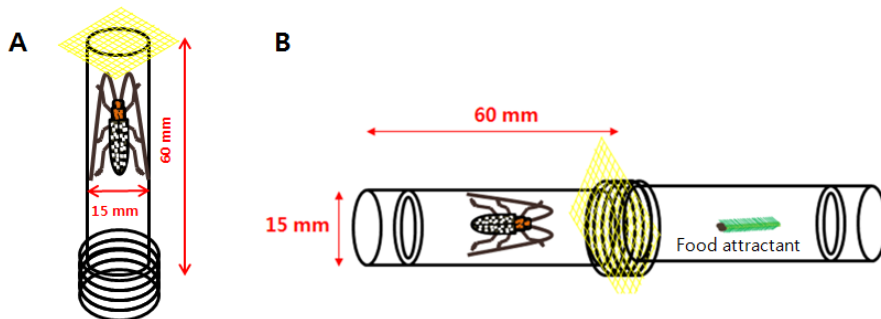


Fig. 1. An experimental devise that shows a confined environment for the study of gnawing and escaping behaviors of *Monochamus alternatus*. A = A basic experimental devise with diameter 15 mm; B = Experimental devise for evaluating the effect of food attractant (diameter 15 mm).

다. 암수 각각 10마리를 동시 촬영하여 탈출행동을 관찰하였고, 세부적인 일련의 탈출행동을 파악하기 위하여 별도의 3개체를 독립적으로 촬영하여 분석하였다.

온도가 솔수염하늘소의 탈출에 미치는 영향. 온도가 솔수염하늘소 탈출성공률에 미치는 영향을 구명하기 위하여 위에서 쏘기와 탈출행동을 유발시키는 직경 15 mm 구속환경(코니컬 튜브) 실험장치를 이용하여 15, 20, 25, 30, 35°C 조건(RH > 50%)에서 탈출여부를 조사하였다. 탈출성공까지 시간을 조절하기 위하여 두 종류의 망사천을 사용하였다. 하나는 앞의 실험에서 사용한 폴리프로필렌 천이었고, 강도가 큰 나이론 망사천을 사용하였다. 한국의류시험연구원(KATRI)에 의뢰하여 얻은 두 망사천의 공인 인장강도와 인열강도는 Table 1과 같았다. 실험구는 망사천 종류와 온도 두 요인을 각각 주구와 세구로 취급하고, 암수 각각 5마리를 집구로 배치하여 각도변환 후 이월 분류 분산분석을 실시하였고 Tukey 검정을 적용하였다(SAS Institute, 1999). 조사는 처리 후 24, 48, 72시간에 탈출여부와 사망여부를 기록하였다.

결과

쏘기와 탈출행동을 유발하는 공간적 구속조건 구명

솔수염하늘소를 직경의 크기가 다른 원통용기(길이 60 mm)

에 구속하고, 시간의 경과에 따른 탈출성공 여부를 조사한 결과는 Table 2와 같았다. 좁은 공간인 직경 15 mm 용기에서는 12시간에 100% 탈출하였으며, 좀 더 직경이 증가된 25 mm와 30 mm에서는 24시간에 모두 탈출에 성공하였다. 하지만 직경이 45 mm와 50 mm 인 용기에서는 48시간에도 전혀 탈출하지 못하였다.

먹이 유인물 존재 여부에 따른 탈출 성공률

망사로 차단된 구속 용기의 반대편에서 먹이(소나무 신초)의 존재 여부에 따른 탈출여부를 조사한 결과 Table 3과 같았다. 구속조건이 직경 15 mm 인 경우 반대편에 먹이가 있든 없든 상관없이 24시간 내에 사망 개체수를 제외하고는 모두 탈출에 성공하였다. 하지만, 단면이 70×70 mm 인 망사로 차단된 경우 먹이 존재와 상관없이 성공적으로 탈출하지 못하고 48시간 이내에 모두 사망하였다.

솔수염하늘소의 쏘기와 탈출 행동관찰

암수 각 10마리를 포함하여 별도로 처리한 3마리의 솔수염하늘소는 모두 탈출에 성공하였으며, 대표적인 일련의 행동과정은 Fig. 2와 같았다. 앞뒤로 직선적인 이동만 가능한 좁은 공간 속에 구속된 솔수염하늘소는 정면에 차단된 망을 감기(쏘기) 시작했다. 이 과정에서 앞다리의 부절이 후면을 향하고 있

Table 2. Escaping rate (%) of *M. alternatus* adults from a confined cage environment according to the diameter of cage at 25°C in the laboratory; the length of cage was 60 mm in all cases

Diameter (mm)	n	Mean body length (mm)	No. of adults escaped by the hours after confinement				Success rate (%) at 48 h	Death before escape
			12	24	36	48		
15	7	21.9	7	7	7	7	100.0	0
25	7	21.4	5	7	7	7	100.0	0
30	7	23.4	2	7	7	7	100.0	0
45	7	22.0	0	0	0	0	0.0	0
50	7	21.9	0	0	0	0	0.0	4

Table 3. The effect of food source on the escape of *M. alternatus* adults in a confined cage environment at 25°C in the laboratory

Dimension of cage	Food source	n	No. escaped until time (h) after treatment				Success rate (%) at 48 h	Death before escape
			12	24	36	48		
Diameter 15 mm with length 60 mm	Yes	10	8	9	9	9	90.0	1
	No	10	7	8	8	8	80.0	2
Section 70 × 70 mm with length 140 mm	Yes	10	0	0	0	0	0.0	10
	No	10	0	0	0	0	0.0	10

The entrance of same two cages (each 15 mm or 70 × 70 mm cage) were put into contacted together between mesh net, and then pine shoots was placed in one side cage.

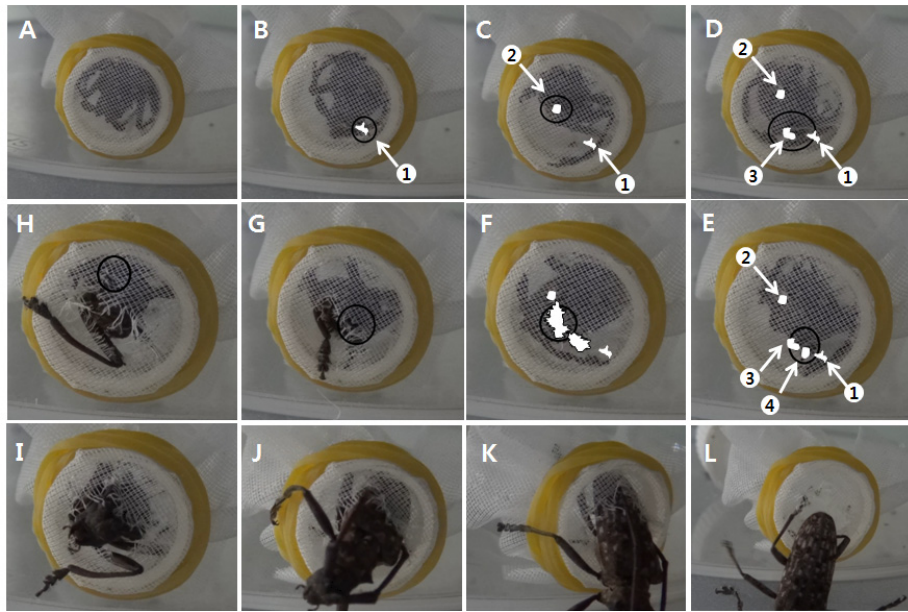


Fig. 2. A typical example for a serial behavior of *M. alternatus* adults which shows whole length of behaviors during gnawing and escaping behaviors in a confined cage environment at 25°C. The number of ① indicates the first attack site on mesh net followed by the consecutive attacks of ② to ④ on scattered position each other. The photo F shows a widen hole by the fusion of each lacerated damage on mesh net.

어지지 역할을 못하기 때문에 가운데 다리와 뒷다리를 이용해 지지와 이동을 하면서 망사천의 면을 갹는 것을 확인할 수 있었다. 또한 큰턱이 닿는 범위 내에서 무작위로 섬유를 갹아 작은 구멍을 만드는 것으로(Fig. 2E: ①②③④), 한 곳에 집중되지 않았다. 이렇게 무작위로 갹아서 손상된 부분이 합쳐지기 시작하면서(Fig. 2F) 망이 찢겨지기 시작하고, 점점 다른 손상 부위와 합쳐져서 커지면서 하늘소가 빠져나올 수 있을 정도로 확대되었다(Fig. 2G). 충분한 구멍이 만들어지면 접혀 있던 앞다리를 밖으로 꺼내기 시작하고 이 과정에서 하늘소가 빠져나오지 못하는 경우 앞다리로 지지한 상태에서 다시 망을 갹기 시작했다(Fig. 2G, H, I). 이후 앞다리를 이용해 구속 공간 바깥쪽을 지지하면서(Fig. 2J) 몸을 구속공간 안에서 바깥으로 끌어당기고 나머지 다리로 몸을 밖으로 밀어내는 과정을 취하면서 탈출하였다(Fig. 2K, L).

온도가 솔수염하늘소의 탈출에 미치는 영향

망의 재질과 온도에 따른 솔수염하늘소의 탈출 성공률은 Table 4와 같았다. 망의 재질과 온도 두 요인은 통계적으로 유의하게 탈출률에 영향을 미쳤다(망의 재질 $F=12.95, P=0.0058$; 온도 $F=6.29, P=0.0107$; $df=9, 19$ in all cases). 집구의 효과(즉 암수에 따른 탈출 성공률)는 없었으며($F=0.89, P=0.3713$), 또한 망의 재질과 온도 간의 상호작용 효과도 없었다($F=1.19,$

$P=0.3772$). 재질의 효과에서 망사의 횡 방향(날실) 인장 및 인열강도가 강한 나이론 망사에서 탈출성공률이 통계적으로 낮았다. 두 요인(재질과 온도) 간 상호작용 효과가 없었기 때문에 폴리프로필렌과 나일론 자료를 분리하여 온도의 영향을 분석하였다(일원분류 분산분석). 폴리에틸렌 망사에서 온도조건은 통계적으로 유의하게 탈출률에 영향을 주는 것으로 나타났다(24h: $df=5, 9; F=7.09, P=0.0271$; 48 & 72h: $df=5, 9; F=7.55, P=0.0239$). 온도가 낮은 15°C에서는 전혀 탈출하지 못하였고, 전체적으로 25°C 조건에서 탈출성공률이 가장 높았다. 반응시간이 길어진 48과 72시간에 20~35°C 범위 온도에서 조사된 탈출 성공률은 비록 35°C에서 낮기는 했으나 통계적으로 차이가 없었다. 나일론 재질 내에서는 온도가 탈출 성공률에 영향을 주지 않았으며(24h $df=5, 9; F=1.41 P=0.3527$; 48 & 72h: $df=5, 9; F=4.17 P=0.0746$), 통계적 차이는 없었으나 15°C에서는 탈출에 성공한 개체가 없었다.

고찰

솔수염하늘소는 직경 30 mm 이하 구속된 공간조건에서 망사천을 갹고 성공적으로 탈출할 수 있었다. 솔수염하늘소의 몸 길이(Table 2 참조)에 안테나의 길이를 더하여 생각할 때 30 mm 이하에서는 몸을 자유롭게 회전시킬 수 없어 정면의 망사천을 집중적으로 공격할 수 있는 것으로 보인다. 하지만, 직경

Table 4. Escaping rate (%) of *M. alternatus* adults from a confined cage environment according to different mesh type and temperature condition

Type of mesh	Temperature (°C)	Escaping rate (%) after hours			Death before escape
		24	48	72	
Polypropylene	15	0.0 b ¹⁾	0.0 b	0.0 b	0
	20	50.0 ab	80.0 a	80.0 a	2
	25	80.0 a	90.0 a	90.0 a	1
	30	50.0 ab	90.0 a	90.0 a	1
	35	70.0 a	70.0 ab	70.0 ab	3
	Sub-mean		50.0 A ²⁾	66.0 A	66.0 A
Nylon	15	0.0 a	0.0 a	0.0 a	0
	20	20.0 a	40.0 a	40.0 a	6
	25	40.0 a	40.0 a	40.0 a	6
	30	20.0 a	20.0 a	20.0 a	8
	35	10.0 a	10.0 a	10.0 a	9
	Sub-mean		18.0 B	22.0 B	22.0 B

¹⁾ The means with same lower case letters in a column of each mesh net are not significantly different by Tukey test (P<0.05).

²⁾ The means with same upper case letters on sub-mean in a column are not significantly different by Tukey test (P<0.05).

이 45 mm 이상으로 증가하면 몸을 회전하여 움직일 수 있어 쓸기행동이 한 곳에 집중되지 못하는 것으로 추정된다. 솔수염하늘소의 쓸기와 탈출행동 관찰(Fig. 2)에서 보듯이 구속된 개체는 앞면의 망사천을 무작위로 긁아서 여기저기 구멍을 내고, 그 구멍들이 합쳐져서 탈출구가 만들어졌다. 이것은 번데기방에서 우화한 성충이 경화 후 머리 위쪽의 나무를 갉아내어 탈출구를 만드는 본능적 행동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 탈출공의 직경이 평균 7.0 mm (범위 4.4~10.1 mm, Chung et al., 2003) 이고, 번데기방의 직경은 이의 두 배 정도가 되므로 자연상태에서도 솔수염하늘소는 우화 후 공간적으로 매우 구속된 조건에 놓여 있게 된다. 따라서 본 연구의 결과는 솔수염하늘소의 본능적 쓸기와 탈출행동에 기반하고 있다.

솔수염하늘소의 쓸기행동이 탈출 성공으로 이어지려면 구속된 조건이 필요하다는 것은 먹이 유인 실험의 결과에서 잘 나타나 있다(Table 3). 심하게 구속되지 않는 경우(70×70 mm)에는 솔수염하늘소가 먹이 방향으로 이동하려고 망사에 접근하여 쓸기행동을 하기는 하지만 공격부위가 집중되지 않아 충분한 크기의 탈출구를 형성하지 못하였다. 실제로 70×70 mm 망사 천의 면에는 분산되어 있는 손상부위가 관찰되었다. 이렇게 솔수염하늘소는 의도적으로 한 곳에 집중하여 쓸기행동을 하지 않는다는 것을 보여주고, 구속조건이 탈출 성공률에 더 중요하다는 것을 알 수 있다.

솔수염하늘소는 외부 탈출 등 다루기 조심스러운 실험곤충이기 때문에 많은 반복실험이 불가능하지만, 직경 15 mm 구속

조건은 총 40마리(온도실험 제외)가 반복되었으며 모두 탈출에 성공하는 결과를 얻었기 때문에 충분히 검증되었다고 판단된다.

온도의 경우 유의하게 탈출 성공률에 영향을 미쳤는데(폴리프로필렌 망사 처리구 참조), 특히 15°C에서는 탈출하는 개체가 발견되지 않았다. 아마도 저온으로 행동의 제약을 받았기 때문으로 보이며, 아직 성충의 행동과 관련된 임계온도는 알려져 있지 않다. 본 실험에서 48시간까지 탈출하지 못한 개체는 모두 사망하였고(Table 4), 망의 인장강도와 인열강도를 높여서 탈출까지 시간을 지연시키는 경우 사망 개체수가 더 많았다. 특히 35°C 고온에서는 10개체 중 9개체가 사망하였다. 솔수염하늘소는 금식시키는 경우 3일 이내 사망하는 것으로 알려져 있는데(Unpublished data), 계속적인 쓸기행동으로 에너지 소모가 많아 더 빨리 사망하는 것으로 보인다.

결론적으로 소나무재선충병 고사목을 피복하여 거기서 우화한 솔수염하늘소가 밖으로 탈출하지 못하도록 방지하는 그물망의 탈출억제 능력(성능)을 생물검정하는 경우 필요한 실험 조건을 다음과 같이 제시할 수 있을 것이다. 솔수염하늘소의 공간적 구속조건은 직경 30 mm 이하로 해야 한다. 다만, 번데기방의 직경과 비슷하고 본 실험에서 검증된 15 mm를 추천할 수 있다. 온도조건은 20~35°C 까지 가능하지만, 고온에서는 탈출 전 사망률이 증가하여 반응시간을 단축시키는 결과를 초래할 수 있으므로 온도효과 실험에서 탈출률이 높았던 25°C가 적합할 것이다. 실험 처리시간은 최소 48시간 이상을 실시해야 한다.

기타, 본 연구에서 정량적으로 검토하지는 않았지만 일반적으로 건조한 경우 성충의 사망률을 증가시키는 요인이 될 수 있으므로 극단적으로 건조(RH 40% 이하)하지 않도록 조절할 필요가 있다. 이상과 같이 본 연구결과는 향후 솔수염하늘소 방제용 그물망의 최종 성능을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구의 일부는 제주특별자치도의 “제주맞춤형 소나무재선충병 조사연구 및 방제전략” 연구용역 사업비로 수행되었음.

Literature Cited

- Ayada, K., Tadano, Takeshi, Endo, Y., 2002. Gnawing behavior of a mouse in a narrow cylinder: A simple system for the study of muscle activity, fatigue, and stress. *Physiol. Behav.* 77, 161-166.
- Card, G.M., 2012. Escape behaviors in insects. *Curr. Opin. Neurobiol.* 22, 180-186.
- Chung, Y.J., Lee, S.M., Kim, D.S., Choi, K.S., Lee, S.G., Park, C.G., 2003. Measurement and within-tree distribution of larval entrance and adult emergence holes of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 42, 315-321.
- Edwards, O.R., Linit, M.J., 1992. Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* through oviposition wounds of *Monochamus carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Nematol.* 24, 133-139.
- Jeong, Y.J. 2002. The damage occurred and spread status of *Bursaphelenchus xylophilus* in Korea. Forestry Research Institute. *Tree Protection* 7, 1-9. (The title was translated to English by authors of this paper)
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2014. Control hope wite paper, design yeol-lim, Jeju. (The title was translated to English by authors of this paper)
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2016. A manual for the control of pine wilt disease in Jeju area. Publication reference No. 79-6500000-000347-01, 169 pp. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Kim, D.S., 2003. Ecological characteristics of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. MS thesis, Gyeongsang Nat. Univ., 56 pp.
- Kim, J.E., 2007. Effects and tasks of fumigation. *Seoul Nat. Univ., Bulletin of the Seoul nat. univ. library* 129, 23-42. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Kishi, Y., 1988. The detailed report on the pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Thomas Co. Ltd., Tokyo, 292 pp.
- Kishi, Y., 1995. The pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Thomas Co. Ltd., Tokyo, 302 pp.
- KFS (Korea Forest Service), 2003. Guidelines for Forest Pests in 2003. 198pp. KFS. (The title was translated to English by authors of this paper)
- KFS (Jeju Special Self-Governing Province), 2016. Management guideline of pine wilt disease (PWD) in Korea. Updated on August 29, 2016, 218 pp. (The title was translated to English by authors of this paper)
- KFS (Jeju Special Self-Governing Province), 2016. Specific audit results for pine wilt disease. KFS. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Korea Research Group of Tree Protection, 2004. Investigation of the effect of pine wilt disease control. Korea Research Group of Tree Protection. *Tree Protection* 9, 8-17. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Kwon, T.S., 2002. The measures for suggested control the eradication of pine wilt disease. Forestry Research Institute. *Tree Protection* 7, 10-18. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Lee, S.G., 2006. Occurrence status of pine wilt disease and control measures. Korea Forest Research Institute. *Tree Protection* 11, 44-53. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Lee, S.M., Jeong, Y.J., Moon, I.S., Lee, S.G., Lee, D.W., Choo, H.Y., Lee, C.K. 2003. Insecticidal Activity and Fumigation Conditions of Several Insecticides against Japanese Pine Sawyer (*Monochamus alternatus*) Larvae. *J. Korean Forest Soc.* 92, pp. 191-198.
- Monro, H.A.U., 1984. Manual of fumigation for insect control. FAO., pp. 78-326.
- Seo, B.S., 2007. The development of pine wilt disease (*Bursaphelenchus xylophilus*) prevention system. MS thesis, Chonbuk Nat. Univ., 60 pp.
- Shin, S.C., 2010. The Damage, research and control status of pine wilt disease in in China. Korea Forest Research Institute. *Tree Protection* 15, 52-62. (The title was translated to English by authors of this paper)
- Woodrow, J.E., LePage, J.T., Miller, G.C., Hebert, V.R., 2014. Determination of methyl isocyanate in outdoor residential air near metam-sodium soil fumigations, *J. Agric. Food Chem.* 62, 8921-8927.
- Yoon, S.R., 2008. A study on the selective control of pine wilt disease and utilization of damaged trees. Ph.D Thesis, Gyeongsang Nat. Univ., pp. 95.