



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

솔수염하늘소 성충의 쏘기행동 및
온도에 따른 섭식면적 분석

Gnawing Behavior of Adults *Monochmus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae)
and the Analysis of Their Feeding Area at Different Temperatures

濟州大學校 大學院

農學科

高敬勳

2019年 2月



솔수염하늘소 성충의 쫓기행동 및 온도에 따른 섭식면적 분석

指導教授 金 桐 淳

高 敬 勳

이 論文을 農學 碩士學位 論文으로 提出함

2019年 2月

高敬勳의 農學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 주 성	
委 員	한 해 남	
委 員	김 등 순	

濟州大學校 大學院

2019年 2月

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
ABSTRACT	1
I. 서 론	2
II. 연 구 사	4
1. 솔수염하늘소의 형태적 특성과 생태	4
2. 솔수염하늘소의 방제방법 연구	5
3. 동물의 섭식, 탈출행동과 생육 연구	6
III. 재료 및 방법	7
1. 구속된 환경에서의 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동 양상	7
1-1. 실험곤충	7
1-2. 좁은 공간과 먹이 유인물 존재에서의 솔수염하늘소의 행동 양상 구명	7
1-3. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동을 유발하는 공간적 구속조건 구명	8
2. 솔수염하늘소의 온도별 섭식량 면적과 수명 측정	17
IV. 결과 및 고찰	19
1. 구속된 환경에서의 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동 양상	19
1-1. 공간조건과 먹이유무에 따른 솔수염하늘소의 행동 양상 결과	19
1-2. 공간적 구속 조건에 따른 솔수염하늘소의 탈출행동 결과	19
1-3. 온도에 따른 솔수염하늘소의 탈출에 미치는 영향	21
1-4. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출 행동양식	21
2. 솔수염하늘소의 온도별 섭식면적 측정 결과	32
V. 적 요	36
VI. 인 용 문 헌	37

List of Tables

Table 1. Tensile, tear strength (N per cm) and lattice distance of two mesh-cloth in longitudinal and transversal direction and thickness of mesh	11
Table 2. Escaping rate (%) of <i>M. alternatus</i> 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	24
Table 3. Escaping rate (%) of <i>M. alternatus</i> 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	25
Table 4. Escaping rate (%) of <i>M. alternatus</i> adults from a confined cage environment according to different mesh type and temperature condition	26
Table 5. Gnawing range (mm ²) and lifespan of <i>M. alternatus</i> according to temperature in the laboratory	34

List of Figures

- Fig. 1. Pine tree logs loaded in emergence chamber (Left), loaded in emergence net (Center) on which logs the entering holes of *M. alternatus* larvae were found, and collected in Jeju and collected *M. alternatus* adults (Right) 12
- Fig. 2. The ankertrass and entering holes of *M. alternatus* larvae 13
- Fig. 3. Collected larvae (Left), puppa (Center) and worms that metamorphosed as adult after breeding (Right) 14
- Fig. 4. Confined cage for escape behavior experiment of *M. alternatus* adult. One of the cylinders was covered with a polypropylene mesh, and the head of the adult was pushed toward the mesh, and the other entrance was closed 15
- Fig. 5. Gnawing traces on mesh cloth by *M. alternatus*. the gnawing trace was converted to a dot on a 1 x 1 mm scale by a computer 16
- Fig. 6. Breeding cage for *M. alternatus* young adult. One adult was introduced into the cage together with a 10 cm length of pine shoots for feeding 18
- Fig. 7. The cumulative gnawing area 5 radius of *M. alternatus* adults according to to the diameter of cage at 25°C in the laboratory 27
- Fig. 8. Cumulative scale of gnawing traces of *M. alternatus* in confined space. 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 28
- Fig. 9. The staggered movement of the *M. alternatus* adult's mandible. Both mandibles can move independently and has tear-off action 29

Fig. 10. Form of larva's mandible and adult's mandible. both have jaw joints and the tip is hooked but larvae have denticle in the middle part. 30

Fig. 11. The ankertrass *M. alternatus* adults. Unlike the ankertrass of the larva of Fig. 2, the particles are small and short. 31

Fig. 12. The cumulative feeding area of *M. alternatus* adults per day according to temperature. 35

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.

In addition, we investigated the feeding rate and average life span at different temperatures to determine the most active period of *M. alternatus*. They had the longest life span at 15 °C, but the total feeding area during the life span was not large. The relationship between the life span and daily average feeding area was inversely correlated in the range of 20 to 35 °C, resulting in a longer life span with daily lower feeding area at 20 °C and a shorter life span with daily higher feeding area at 35 °C. Therefore, the results of this study will be useful to facilitate management options by environmental temperatures.

I. 서 론

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

소나무재선충병의 확산 방지를 위하여 매개충인 솔수염하늘소를 우선적으로 방제하는 것으로 초점이 맞추어졌는데 (KFS, 2003), 소나무 고사목을 별채하여 내부의 유충을 훈증약제로 사멸시키는 방법이 가장 널리 사용되고 있다(KFS, 2016). 훈증방법은 고사목을 토양위에 적재하여 피복제(타포린 천막)로 덮어 밀봉하고 메타소듐 등 훈증제를 처리하는 방법이다(Monro, 1984; Lee *et al.*, 2003). 그러나 이러한 훈증 방법은 환기가 되지 않은 상황에서 소독약제가 배출되지 않고 봉인 기간이 길기 때문에 무심코 훈증막을 열어 보았거나 훼손한 사람들에게 피해가 갈수 있다는 문제가 꾸준히 제기 되었다(Kim, 2007). 또한 메타소듐의 분해 산물인 맹독성의 Methyl isocyanate(MIC)가 방출될 수 있다는 결과가 외국에서 보고되었다(Woodrow *et al.*, 2014). 국립산림과학원에 의하여 MIC의 방출량이 노출허용기준 이하의 극미량인 것으로 밝혀졌으나(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(Kwak, 2003) 대체 방법의 개발이 절실히 요구된다.

현재 훈증 대체방법으로 파쇄, 소각, 매몰, 박피 및 그물망 피복 등 다양한 방법이 제시되고 있다(JSSGP, 2016; KFS, 2016; Seo, 2007). 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 내

부에 있는 매개충의 알, 유충 및 번데기 등을 발육단계에서 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 우화하여 단단한 목질부를 뚫고 밖으로 탈출한다(Chung *et al.*, 2003). 따라서 방제에 사용되는 그물망은 솔수염하늘소 성충이 뚫고 탈출 할 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).

또한 솔수염하늘소의 그물망 피복 방제를 위해서는 솔수염하늘소의 생태특성을 이해하여 솔수염하늘소의 각 지역, 고도에 따른 방제 관리 방안을 마련할 필요가 있다. 현재 우리나라에서는 소나무재선충 방제를 위한 효율적 방제시스템에 관한 연구가 진행되고 있으며(Yoon, 2008; Jeong, 2015), 성충 우화자료(Kim, 2010)를 바탕으로 한 우화시기 예측 모형(Park *et al.*, 2013)과 성충의 온도 의존적 산란, 유충의 온도 의존적 발육이 연구 되어(Kwon, 2017), 이에 따른 방제전략을 수립할 수 있으나 소나무재선충을 옮기는 과정중 하나인 성충의 섭식행동과 섭식면적 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 솔수염하늘소의 쏘기(괘기)와 탈출행동을 유발하는 조건을 구명하고 방제용 그물망 성능(강도)의 생물검정을 위한 표준조건을 제시하며 제주지역에서의 온도에 따른 솔수염하늘소의 관리 체계 방안을 제공하고자 수행하였다. 성충 탈출 전 직면하는 번데기방과 유사한 공간적 구속조건을 조성하여 평가하였으며, 온도조건이 탈출 성공에 미치는 영향 등을 구명하였다.

II. 연 구 사

1. 솔수염하늘소의 형태적 특성과 생태

솔수염하늘소는 딱정벌레목 하늘소과의 곤충으로써 1842년 Hope에 의해 *Monochamus alternatus*로 기록되었다(Kishi, 1995). 국내에서는 2001년과 2002년 2년 동안 갓 우화탈출한 성충 암수 각각 563마리와 601마리를 채집하여 생체중, 체장, 체폭, 두폭 및 안테나의 길이와 색깔을 조사하였는데 암컷 성충의 생체중이 평균 0.305 g, 수컷 성충은 평균 0.277 g 으로 암컷이 수컷에 비해 무거운 것으로 조사되었으며 체장은 암수 각각 평균 20.97 mm, 19.93 mm로 암컷이 다소 긴 편이나 큰 차이는 없었다. 체폭은 암수 평균 6.52 mm, 6.18 mm로서 암컷이 다소 넓은 편이나 유의미한 차이는 아니었으며 두폭은 암수 평균 3.78 mm, 3.70 mm 로서 암컷이 다소 넓은 편이나 두폭의 크기 차이가 유의미하진 않았다. 더듬이 길이는 암컷이 평균 31.19 mm 로서 체장의 1.4~2.0배이었고, 수컷은 평균 45.49 mm 로서 체장의 1.6~3.0배였다. 여기에 암수 성충의 더듬이 색깔을 조사한 결과 예외 없이 암컷 더듬이의 모든 편절마디의 절반 아래쪽에는 회백색의 미모로 덮여 있으나 수컷 더듬이의 편절마디는 전체적으로 흑갈색의 미모로 덮여 있기 때문에 육안으로 쉽게 구분이 가능하다(Kim, 2003).

솔수염하늘소는 소나무재선충을 매개하며 스스로 이동할 수 없는 소나무재선충이 매개충 내에 잠복해 있다가 기주식물의 가지를 섭식하면서 생기는 상처를 통해 조직으로 전파되며 기주식물의 수분과 양분 이동을 방해하여 기주식물을 고사시킨다(Mamiya and Enda, 1972; Morimoto and Iwasaki, 1972).

솔수염하늘소의 생활사에 대한 연구를 보면 국내에서는 남부지방을 중심으로 소나무와 곰솔에서 주로 매개하며(Moon *et al.*, 1995; Kwon *et al.*, 2006). 기주식물은 *Pinus* 속의 여러 종류(Furuno and Uenaka, 1979)와 삼나무, 편백 등(Yamane and Akimoto, 1974; Nakamura and Okochi, 2002)이며, 주로 연 1회 발생하지만 2년에 1세대가 발생하기도 한다(Kim *et al.*, 2003). 국내의 자연 상태에서의 발육기간은 알 상태에서는 6월 중순~8월 상순, 유충 상태에서는 8월 중순에서 이듬해 5월 상순, 번데기 상태에서는 4월 하순~6월 중순, 성충은 5월 하순~8월 상순으로 알려져 있다(Park *et al.*, 1992). Kim *et al.*(2003)에 의하면 성충의 발생 시기는 5

월 중순에서 8월 초순까지로 조사되었다.

일본의 경우도 1년에 1세대 혹은 2년에 1세대의 생활사를 가진다.(Kishi, 1995). 우화 탈출기간에 대해서는 지역 간 차이가 존재하는데 일본의 남서쪽 섬지역의 Okinawa 지역에서 4월 초순에서 8월까지로 조사가 되었고(Irei *et al.*, 2004), 일본 본토에서는 5월에서 7월(Togashi and Magira, 1981) 또는 5월에서 8월까지 조사되었다(Kishi, 1995). 또한 북쪽 Honshu에서는 6월 하순에서 8월까지 조사 되었다(Chida and Sato, 1981; Hoshizaki *et al.*, 2005). 중국 남부지방에서는 솔수염하늘소는 1년에 2~3세대를 가진다. 따라서 우화하는 솔수염하늘소 성충 수의 계절적인 변화가 4월에서 11월 사이에 2~3차례의 최성기를 보여 준다(Song *et al.*, 1991).

제주지역에서의 성충의 우화는 대부분 170(Julian date)에서 190(Julian date)으로 6월 말부터 7월 초까지로 조사되었고 9년간 채집된 2,705마리의 성충에서 암컷과 수컷의 발생비율은 약 0.9(수컷 수/암컷 수)로 조사되었다(Kim, 2015).

2. 솔수염하늘소의 방제방법 연구

솔수염하늘소의 방제를 위해서는 성충의 우화시기를 조사하여 이들의 섭식활동을 저해하기 위한 약제 살포 적기를 파악하는 것이 중요하다. 현재까지는 연도, 지역 간의 우화시기 차이가 심하여 예측이 어려운 실정이며 발육 영점 온도 이상의 유효적산온도를 이용한 우화탈출시기 예측방법도 실제 야외조사와는 잘 맞지 않는 경향을 보인다(Kishi, 1995). 방제법으로는 임업적 방제, 화학적 방제, 생물학적 방제 등이 있다(Kishi, 1995). 국내에서는 2006년부터 2014년까지 제주도에 9년 동안 솔수염하늘소의 성충 우화시기를 조사하여 지상 및 항공방제의 기초자료를 제시하였다(Kim, 2015). 이외에 개미침벌류를 이용하여 솔수염하늘소를 숙주로 많은 알을 낳게 하는 생물학적 방제 방법이 있으며(Maeta and Kitamura, 2003), 우리나라 각지에 서식하는 포식성 기생봉인 *Scleroderma guani*(Lee *et al.*, 2006)를 이용하여 다른 방제법과 함께 소나무재선충병 피해지에 방사했을 때 2년 후에 고사목 감소율이 97% 이상의 성과를 얻었다고 한다.(Xu *et al.*, 2004). 화학적인 방법으로는 감염목에 훈증제로 1995년부터 aluminium phosphide가 사용되어 오다가 2002년 이후부터는 metam-sodium이 aluminium phosphide보다 효과적으로 사용되고 있다(Lee *et al.*, 2003). 이후 환경 요인에 대

한 문제로 metam-sodium에 대한 대체약제로 ethanedinitrile(EDN)이 제시되었으며, EDN을 110g/m³ 이상, 2주 동안 처리하였을 때 소나무 내 월동중인 솔수염하늘소 유충과 소나무재선충을 100% 방제하였다고 한다(Son, 2009).

3. 동물의 섭식, 탈출행동과 생육 연구

동물의 행동 연구를 통해 지역, 시간, 온도에 따른 동물들의 생태와 수명 그리고 수명 내 먹는 양을 유추할 수 있어 이에 따른 대책을 준비 할 수 있다. 국내에서는 멸종위기 1급 야생생물인 황새의 기온변화와 생활주기변화에 따른 일일 섭식량 변화량 분석을 통해서 황새의 행동 및 생태에 대한 자료를 축적하고 인공 증식의 최적 환경에 대한 정보가 제시되었다(Kwon, 2013). 또한 야생동물, 곤충에 의하여 농작물과 생태계에 영향을 받는 일이 많으며 그 피해는 대부분이 동물들의 섭식 행동에 의한 피해가 많은데 이에 섭식량 분석을 통하여 작물 멧돼지의 식이물과 농작물의 피해량 분석을 통해서 먹이 가용성에 따라 벼의 피해가 가장 많다는 것을 추정하였으며(Lee, 2013), 곤충의 애호랑나비의 산란과 유충의 섭식식물 엽량의 상관관계를 조사하여 섭식식물의 잎 면적에 알 수는 비례하였으나 섭식식물 개체 수에 대한 산란 횟수는 불규칙하다는 것을 알아내기도 하였고(Kim, 2000), 먹이원 주변의 제한된 공간에서 경험한 온도에 반응하는 토종 벌 일꾼의 외역활동을 조사한 결과 특정 온도에서 시간이 지남에 따라 먹이 섭취 빈도수가 점차 증가하는 경향을 보였다는 것을 확인할 수 있었다(Kim, 2016). 동물의 탈출행동을 통한 생물검정법이 제시되기도 했는데 쥐가 좁은 공간에 구속되었을 때 탈출을 위한 쏘기(잡기)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 유도 된다는 사실이 밝혀지고 있다(Card, 2012). 이렇게 동물의 행동 특성을 이해하여 특수한 생물검정법을 수립하는 것은 생물학적으로 타당하다고 생각된다.

III. 재료 및 방법

1. 구축된 환경에서의 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동 양상

1-1. 실험곤충

본 연구에 필요한 솔수염하늘소를 확보하기 위하여 2016년 1~3월, 2016년 11월 ~ 2017년 1월, 2차례에 걸쳐 제주도 제주시 애월읍 각지의 소나무재선충 고사목 임시처리장에서 솔수염하늘소 유충의 섭식흔과 침입공이 있는 나무를 수거하였다(Fig. 1). 수거한 고사목은 제주대학교 아라동 캠퍼스 농장, 제주시 오등동 한라산CC, 제주도립 한라생태숲에 각각 설치한 그물망과 간이 철재 우화상에 적재 후(Fig. 2) 이듬해 6월부터 8월까지 주 3회 수거하여 얻었다(Fig. 3). 수거된 솔수염하늘소는 이물질과 응애 등의 기생충을 제거하기 위해 증류수를 이용하여 세척 후 제주대학교 곤충학실험실 사육실에서 온도조건 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 와, 광주기16L:8D 조건으로 아크릴 케이지(300×600×300 mm)에서 사육되었다. 사육 공간에는 솔수염하늘소가 뒤집혔을 때 쉽게 일어날 수 있게 하기 위해 소나무 조각을 높이목으로 설치하고 솔잎을 깔았으며 주 2회 충분한 양의 소나무 신초를 물을 1/2 채운 비이커에 꽂아서 공급해 주었다.

또한 2016년 10 ~ 11월, 2017년 12월 두 차례에 걸쳐 제주시 일대에서 고사목을 수거 후 제주대학교 친환경농업연구소 근처의 공터에서 손도끼와 망치를 이용해 솔수염하늘소 유충을 채집하였다. 이후 원형 아크릴 사육용기(지름 50 × 높이 15 mm)에 소나무 톱밥을 깔아 사육(Fig. 4)하여 항온기(DS-8CL, (주)다솔과학)에서 30°C 에서 사육 후 번데기를 거쳐 성충까지 우화된 개체를 사용하였다(Kwon, 2017).

1-2. 좁은 공간과 먹이 유인물 존재에서의 솔수염하늘소의 행동 양상 구명

솔수염하늘소의 탈출 행동이 우화 직후의 본능인지, 좁은공간에서의 탈출 행동 본능인지에 대해 알아보기 위하여 투명 코니컬 튜브(용량 5 ml, 직경 16 mm, 내 직경 14.5 mm, 길이 60 mm; Stockwell® Korea)의 말단부(길이 10 mm)를 잘라내어 폴리프로필렌 망사천(see Table 1 for the details)으로 덮어 차단하고 반대편입

구로 우화 직후의 솔수염하늘소를 넣어 뚜껑을 닫았다(Fig. 4). 이후 25℃의 온도 조건에서 12 h 내의 탈출 양상을 체크하였으며 총 20개체를 1일 1회, 연속으로 10일까지 반복시켜 행동의 변화 양상을 측정하였다. 각 개체는 1회의 실험 이후 사각뿔대 형태 아크릴 용기(상단부 70 × 70 mm, 하단부 50 × 50 mm, 높이 140 mm, SPL®, No.310076)에 충분한 양의 소나무 신초를 넣어 체력을 회복시켜주고 다음날 재 실험을 진행하였다. 또한 먹이 유인물질의 존재여부가 솔수염하늘소의 탈출행동에 영향을 미치는지 구명하기 위하여 구속공간과 먹이조건을 조합 처리하여 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 신초를 제공하거나 비어두었다. 행동적 구속에 크게 영향을 미치지 않는 구속조건은 솔수염하늘소가 자유롭게 몸을 돌릴 수 있는 직경이 상단부 70 × 70 mm, 하단부 50 X 50 mm, 길이 140 mm 사각 아크릴 통(SPL®, No.310076)을 두 개를 맞대어 마련하였다. 이 경우에도 중간을 폴리프로필렌 망사천으로 격리 하였다. 이후 먹이 제공 여부에 따라 탈출여부를 조사하였다. 먹이는 시각, 후각적으로 솔수염하늘소를 자극할 수 있게 망 너머로 설치하였다. 실험은 솔수염하늘소 성충사육케이지에서 무작위로 성충을 채취하여 사용하였고, 25℃ 조건에서 처리 후 12, 24, 36, 48시간에 조사하였다.

1-3. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동을 유발하는 공간적 구속조건 구명

솔수염하늘소의 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(Table 1)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. 성충이 망사쪽과 접촉할 수 있도록 아크릴 파이프를 지면에서 망 방향이 지면을 향하도록 약 15도 경사지게 설치하였다. 또한 솔수염하늘소가 다리로 파이프의 벽을 지탱하여 힘을 집중할

수 있도록 파이프 벽에 구멍(≈ 10 mm 간 격)을 뚫어 착지점을 제공하였다. 각 직경별 20마리를 반복하였으며, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h에 탈출 성공여부와 탈출하지 못하고 사망한 개체수를 조사하였다. 실험에 이용한 개체는 우화 후 30일 이내이었으며 암수는 구분하지 않았다.

1-3-1. 구속 공간에 따른 솔수염하늘소의 쫓기 행동 변화 구명.

공간적 구속에 따른 솔수염하늘소의 쫓기 행동 변화에 대해 알아보기 위하여 실험 후 가해된 폴리프로필렌 망사천을 수거하여 촬영 후(Apple, iPhone 6s) 사진에 나온 투입구의 외경에 실제적인 지름을 맞추어 1 X 1 mm의 격자를 만든 후(Adobe, Photoshop CS6) 가해된 지역의 면적을 전부 표시하여 쫓기 행동 흔적을 조사하였다(Fig. 5).

1-3-2. 온도에 따른 솔수염하늘소의 탈출 행동 변화 구명

온도가 솔수염하늘소 탈출성공률에 미치는 영향을 구명하기 위하여 위에서 쫓기와 탈출행동을 유발시키는 직경 15 mm 구속환경(코니컬 튜브) 실험장치를 이용하여 15, 20, 25, 30, 35 \pm 0.5 $^{\circ}$ C 조건(RH > 50%)으로 설정된 항온기(DS-8CL, (주)다솔과학)에 처리 후 탈출여부를 조사하였다. 탈출성공까지 시간을 조절하기 위하여 두 종류의 망사천을 사용하였다. 하나는 앞의 실험에서 사용한 폴리프로필렌 천이었고, 강도가 크며 신축성이 있는 나일론 망사천을 사용하였다. 한국의 류시험연구원(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 이원 분류 분산분석을 실시하였고 Tukey 검정을 적용하였다(SAS Institute, 1999). 조사는 처리 후 24, 48, 72시간에 탈출여부와 사망여부를 기록하였다.

1-3-3. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출 행동양식 구명

솔수염하늘소를 사육실에서 온도조건 25 \pm 1 $^{\circ}$ C와, 광주기16L:8D 조건으로 위 15 mm 구속환경에 처리하고 망사를 깔고 탈출하는 행동을 관찰하였다. 행동의 전 과정을 비디오 카메라(SONY HDRPJ660, Japan)로 촬영하여 일련의 행동을 육안

으로 분석하였다. 비디오 카메라는 코니컬 튜브의 망사면을 향하게 정면에 대고 촬영을 하였으며 망 너머로 솔수염하늘소의 머리가 보이며 망을 가해하는 장면이 나올 수 있도록 암수 각각 10마리를 동시 촬영하여 망을 가해하는 행동과 탈출행동을 관찰하였다. 세부적인 일련의 탈출을 파악하기 위하여 별도의 3개체를 독립적으로 촬영하여 분석하였다.

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 IO 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		mm	
	transversal	0.20	0.25		
Thickness	Longitudinal & Transversal	0.10		mm	

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



Fig. 1. Pine tree logs loaded in emergence chamber (Left), loaded in emergence net (Center) on which logs the entering holes of *M. alternatus* larvae were found, and collected in Jeju and collected *M. alternatus* adults (Right).

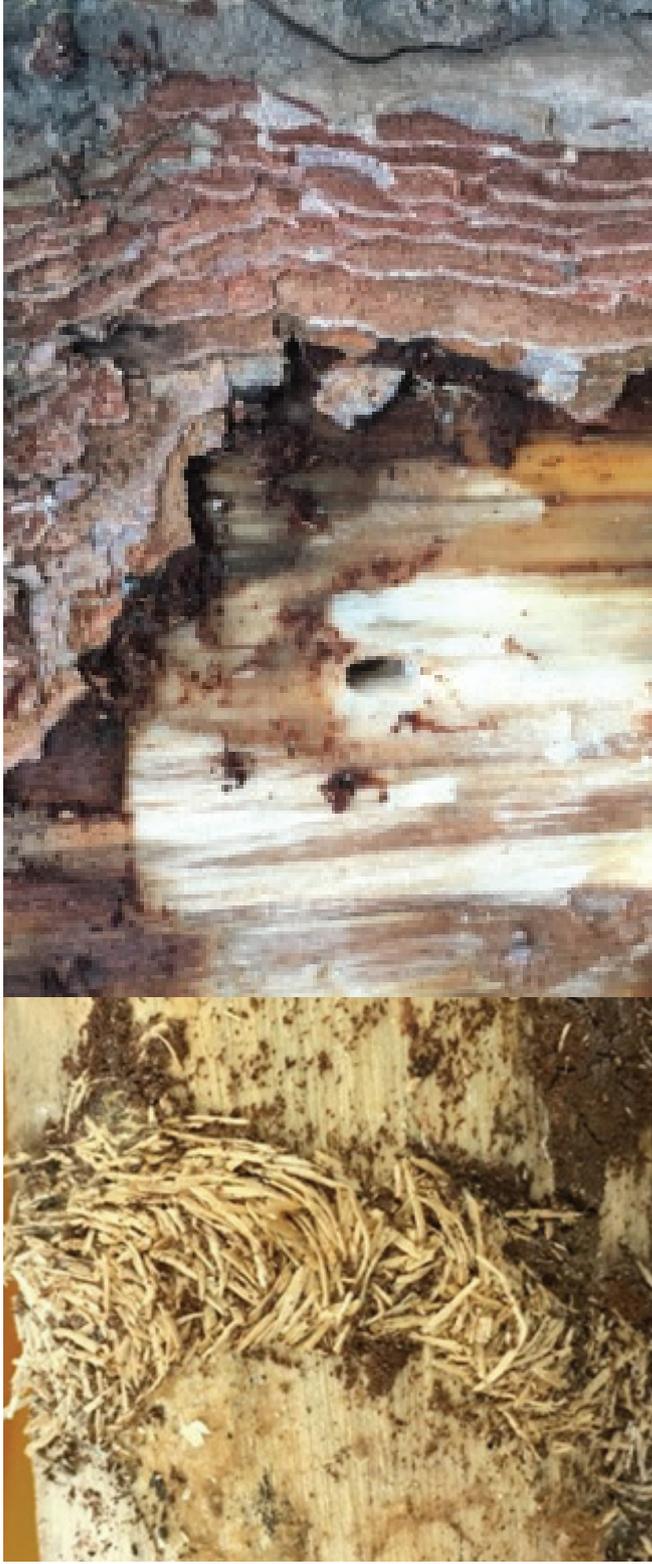


Fig. 2. The ankertrass and entering holes of *M. alternatus* larvae.



Fig. 3. Collected larvae (Left), puppa (Center) and worms that metamorphosed as adult after breeding (Right).



Fig. 4. Confined cage for escape behavior experiment of *M. alternatus* adult. One of the cylinders was covered with a polypropylene mesh, and the head of the adult was pushed toward the mesh, and the other entrance was closed.

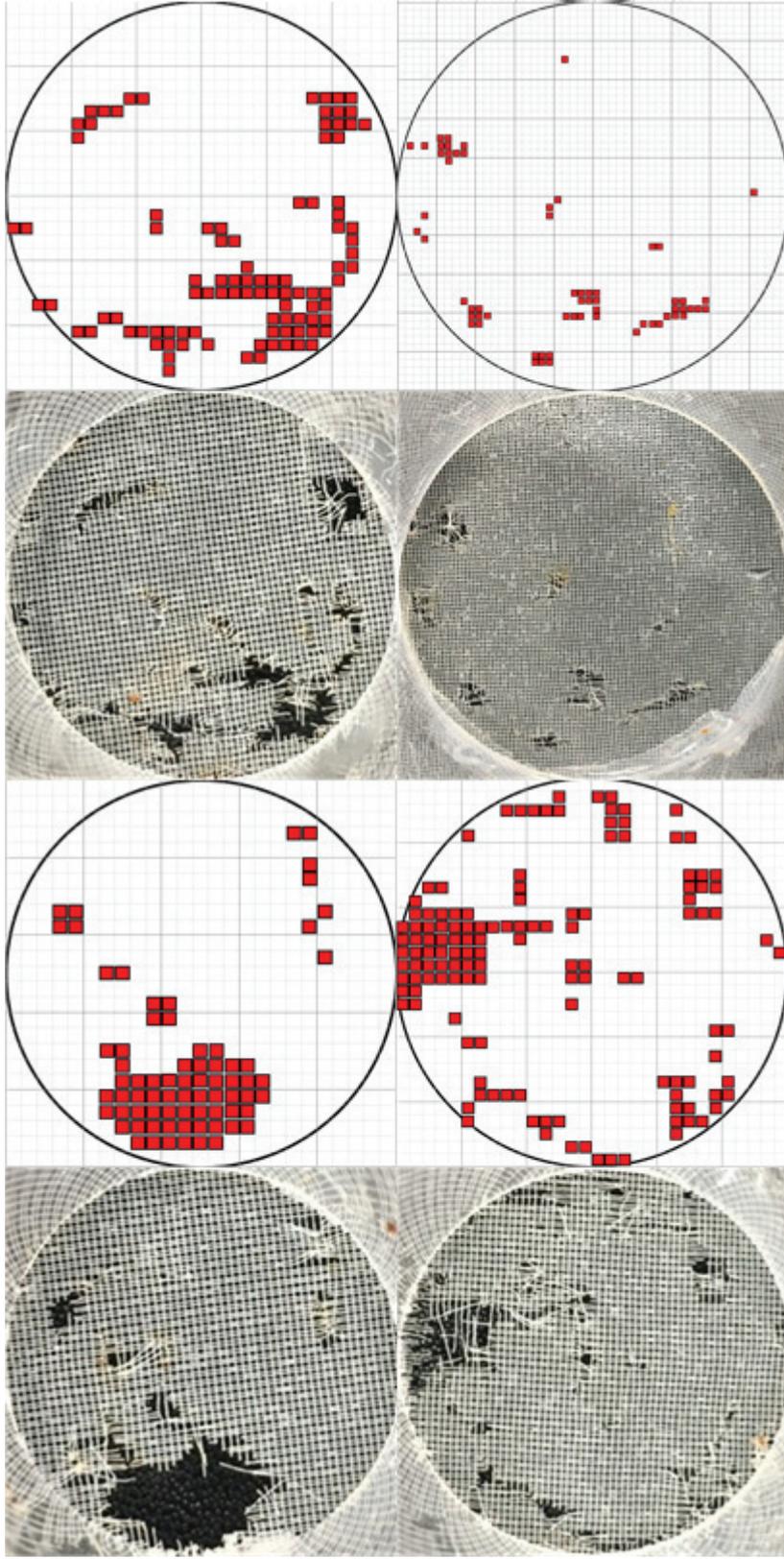


Fig. 5. Gnawing traces on mesh cloth by *M. alternatus*. the gnawing trace was converted to a dot on a 1 x 1 mm scale by a computer.

2. 솔수염하늘소의 온도별 섭식량 면적과 수명 측정

솔수염하늘소 성충의 수명 내 온도별 섭식량 면적 측정을 위하여 15, 20, 25, 30, $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 조건(RH > 50%)으로 설정된 항온기(DS-8CL, (주)다솔과학)에 직경 상단부 70 x 70 mm, 하단부 50 x 50 mm, 길이 140 mm 사각 아크릴 통 안에 40 mm 높이로 스펀지로 바닥을 채우고 가운데 구멍을 뚫은 이후 먹이로 사용하는 소나무 싹초를 140 mm로 잘라 높이 100 mm가 돌출되게 설치 후 Fig. 6 과 같이 처리하였다. 섭식량의 면적 측정의 정확성을 위해 표면만 갠아먹을 수 있는 정도의 5 ~ 10 mm이내 굵기의 소나무 싹초만을 활용하였으며 이후 우화 직후의 성충을 투입 후 같은 사각 아크릴 통으로 맞대어 밀폐하였으며 먹이는 일주일에 3회 교체하였고 지속적으로 수분을 공급하였다. 실험 과정에서 관리실 수 혹은 질병으로 인해 조기 사망한 개체는 조사대상에서 제외하였다. 실험 중에 교체 되어 회수된 소나무 싹초는 A4 용지 크기의 2 x 2 mm 투명 격자를 대어 갠 지역을 표시하였고 표시된 격자수를 세어 섭식 면적을 조사하였다. 실험은 각 성충이 사망할 때까지 지속하였으며 실험구는 온도를 주구로 하였고 수컷을 각각 5, 7, 7, 6, 6 개체, 암컷을 각각 8, 7, 6, 7, 7 개체를 집구로 배치하여 이원 분류 분산분석을 실시하였고 t-검정과 GLM 검정을 적용하였다(SAS University Edition, 2018). 조사는 소나무싹초를 처리 후 소나무 싹초를 갠 총 평균 면적과 일 평균면적 그리고 평균 수명을 기록하였다.



Fig. 6. Breeding cage for *M. alternatus* young adult. One adult was introduced into the cage together with a 10 cm length of pine shoots for feeding.

IV. 결과 및 고찰

1. 구속된 환경에서의 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동 양상

1-1. 공간조건과 먹이유무에 따른 솔수염하늘소의 행동 양상 결과

솔수염하늘소가 좁은 공간에 있을 시에 개체가 열흘간 전부 탈출행동을 보이는 양상을 보였다. 이는 초창기 우화했을 때에 첫 본능에 따른 탈출행동이 아닌 구속된 공간에 있을 경우의 본능적 쫓기행동을 통하여 탈출을 유발한다는 것으로 판단된다. 자연 상태에서의 솔수염하늘소는 우화 직후 탈출공을 만들고 밖으로 탈출하게 되는데 탈출공의 직경이 평균 7.0 mm (범위 4.4~10.1 mm, Chung *et al.*, 2003) 이고, 번데기방의 직경은 이의 두 배 정도가 되므로 자연 상태에서도 솔수염하늘소는 우화 후 공간적으로 매우 구속된 조건에 놓여 있게 된다. 따라서 본 연구의 결과는 솔수염하늘소의 본능적 쫓기와 탈출행동에 기반하고 있다.

망사로 차단된 구속 용기의 반대편에서 먹이(소나무 신초)의 존재 여부에 따른 탈출여부를 조사한 결과 Table 1과 같았다. 구속조건이 직경 15 mm인 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 쫓기행동이 탈출 성공으로 이어지려면 구속된 조건이 필요하다는 것은 먹이 유인 실험의 결과에서 잘 나타나 있다(Table 2). 심하게 구속되지 않는 경우(70×70 mm)에는 솔수염하늘소가 먹이 방향으로 이동하려고 망사에 접근하여 쫓기행동을 하기는 하지만 공격부위가 집중되지 않아 충분한 크기의 탈출구를 형성하지 못하였다. 실제로 70×70 mm 망사천의 면에는 분산되어 있는 손상부위가 관찰되었다. 이렇게 솔수염하늘소는 의도적으로 한 곳에 집중하여 쫓기행동을 하지 않는다는 것을 보여주고, 구속조건이 탈출 성공률에 더 중요하다는 것을 알 수 있다.

1-2. 공간적 구속 조건에 따른 솔수염하늘소의 탈출행동 결과

솔수염하늘소를 직경의 크기가 다른 원통용기(길이 60 mm)에 구속하고, 시간

의 경과에 따른 탈출성공 여부를 조사한 결과는 Table 2와 같았다. 좁은 공간인 직경 15 mm 용기에서는 12시간 내에 100% 탈출하였으며, 좀 더 직경이 증가된 25 mm도 24시간에 모두 탈출에 성공하였다. 하지만 30 mm부터 소수 개체가 탈출하지 못해 사망하기 시작하였고 45 mm에서는 2개체만이 탈출에 성공하였고 직경이 50 mm 인 용기에서는 48시간에도 전혀 탈출하지 못하였다.

솔수염하늘소는 직경 30 mm 이하 구속된 공간조건에서 망사천을 갇고 성공적으로 탈출할 수 있었다. 솔수염하늘소의 몸길이(Table 3 참조)에 안테나의 길이를 더하여 생각할 때 30 mm 이하에서는 몸을 자유롭게 회전시킬 수 없어 정면의 망사 천을 집중적으로 공격할 수 있는 것으로 보인다. 하지만, 직경이 45 mm 이상으로 증가하면 몸을 회전하여 움직일 수 있어 쫓기행동이 한 곳에 집중되지 못하는 것으로 추정된다. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출행동 관찰(Fig. 8)에서 보듯이 구속된 개체는 앞면의 망사천을 무작위로 갇아서 여기저기 구멍을 내고, 그 구멍들이 합쳐져서 탈출구가 만들어졌다. 이것은 번데기방에서 우화한 성충이 경화 후 머리 위쪽의 나무를 갇아내어 탈출구를 만드는 본능적 행동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 솔수염하늘소는 외부 탈출의 위험 등 다루기 조심스러운 실험곤충이기 때문에 많은 반복실험이 불가능하지만, 직경 15 mm 구속조건은 총 70마리(온도실험 제외)가 반복되었으며 모두 탈출에 성공하는 결과를 얻었기 때문에 충분히 검증되었다고 판단된다.

솔수염하늘소의 공간적 구속 조건에서 솔수염하늘소의 쫓기 행동 변화는 Fig. 7 와 같다. 직경 15 mm 구속 조건에서는 솔수염하늘소가 중앙부분만을 갇을 수 밖에 없기 때문에 중심 기준 반지름 5mm 내에서 전부 집중해서 갇은 형태를 볼 수 있다. 직경 25 mm 구속 조건에서는 반지름 5 mm 내에서는 갇은 흔적을 보이지 않다 반지름 5 ~ 10 mm 사이에서 많은 양을 갇는 양상을 볼 수 있고 그 이상 지점부터 다시 갇은 흔적이 적어지는 모습을 볼 수 있다. 직경 30 mm 지점에서는 중앙에서부터 바깥쪽으로 갈수록 갇은 흔적이 많아지는 모습을 볼 수 있으며 직경 45 ~ 50 mm 지점에서는 중앙에서 바깥쪽으로 갈수록 갇은 흔적이 많아 지나 바깥쪽으로 갇은 흔적이 퍼지는 정도가 다른 세 실험구에 비해 적은 편이다.

1-3. 온도에 따른 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 나일론 망사에서 탈출 성공률이 통계적으로 낮았다. 두 요인(재질과 온도) 간 상호작용 효과가 없었기 때문에 폴리프로필렌과 나일론 자료를 분리하여 온도의 영향을 분석하였다(일원 분류 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°C 에서는 전혀 탈출하지 못하였고, 전체적으로 25°C 조건에서 탈출성공률이 가장 높았다. 반응시간이 길어진 48과 72시간에 $20\sim 35^{\circ}\text{C}$ 범위 온도에서 조사된 탈출 성공률은 비록 35°C 에서 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°C 에서는 탈출에 성공한 개체가 없었다.

온도의 경우 유의하게 탈출 성공률에 영향을 미쳤는데(폴리프로필렌 망사 처리구 참조), 특히 15°C 에서는 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. 음식의 환경에서 지속적인 쫓기 행동으로 에너지 소모가 많아 빨리 사망하는 것으로 보인다.

1-4. 솔수염하늘소의 쫓기와 탈출 행동양식

암수 각 10마리를 포함하여 별도로 처리한 3마리의 솔수염하늘소는 모두 탈출

에 성공하였으며, 비디오 카메라(SONY HDRPJ660, Japan)로 탈출과정을 촬영하여 분석한 결과 대표적인 일련의 행동과정은 Fig. 8 과 같았다. 앞뒤로 직선적인 이동만 가능한 좁은 공간 속에 구속된 솔수염하늘소는 정면에 차단된 망을 갇기(쓸기) 시작했다. 이 과정에서 앞다리의 부절이 후면을 향하고 있어 지지 역할을 못하기 때문에 가운데 다리와 뒷다리를 이용해 지지와 이동을 하면서 망사천의 면을 갇는 것을 확인할 수 있었다. 또한 큰턱이 닿는 범위 내에서 무작위로 섬유를 갇아 작은 구멍을 만드는 것으로(Fig. 8E: ①②③④), 한 곳에 집중되지 않았다. 이렇게 무작위로 갇아서 손상된 부분이 합쳐지기 시작 하면서(Fig. 8F) 망이 찢겨지기 시작하고, 점점 다른 손상 부위와 합쳐져서 커지면서 하늘소가 빠져나올 수 있을 정도로 확대되었다(Fig. 8G). 충분한 구멍이 만들어지면 접혀 있던 앞다리를 밖으로 꺼내기 시작하고 이 과정에서 하늘소가 빠져나오지 못하는 경우 앞다리로 지지한 상태에서 다시 망을 갇기 시작했다(Fig. 8G, H, I). 이후 앞다리를 이용해 구속 공간 바깥쪽을 지지하면서(Fig. 8J) 몸을 구속공간 안에서 바깥으로 끌어당기고 나머지 다리로 몸을 밖으로 밀어내는 과정을 취하면서 탈출하였다(Fig. 8K, L). 이러한 탈출 행동은 우화탈출에서의 행동양상과 같다(Kim, 2003). 솔수염하늘소의 턱의 운동은 Fig. 9 과 같다. 솔수염하늘소의 큰턱은 좌우가 함께 움직이는 것이 아닌 좌우가 독립적으로 움직이는 것이 가능하였으며 집게 형태의 큰턱을 서로 맞대기도 하고 서로 엇갈리게 쥐어뜯는 행동을 하기도 하였다(Fig. 9). 강한 고정 형태의 나무와는 다르게 망은 유동성이 강하기 때문에 턱의 움직임 또한 자유롭게 움직이면서 망을 가해하는 모습을 볼 수 있었다. 또한 유충의 턱과는 다르게 큰턱에 치상의 돌기가 없기 때문에(Fig. 10) 유충의 섭식흔적과는 완전히 다른 형태의 소나무 섭식 흔적을 만들어 내었다(Fig. 11).

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, 번데기 방의 직경과 비슷하고 본 실험에서 검증된 15 mm를 추천할 수 있다. 솔수염하늘소의 탈출공의 크기는 수관에서 평균 7.12 mm, 수간에서 평균 6.72 mm(Kim, 2003)이므로 이에 맞게 실험 장치를 설치해 주는 것이 탈출행동을 유발하는데 가장 적합할 수

있다. 그러나 위의 조건에서 실험을 할 때는 구속 시에 솔수염하늘소의 물리적인 저항으로 실험을 진행하기 어렵다. 온도조건은 20~35℃까지 가능하지만, 고온에서는 탈출전 사망률이 증가하여 반응시간을 단축시키는 결과를 초래할 수 있으므로 온도효과 실험에서 탈출률이 높았던 25℃가 적합 할 것이다. 실험 처리시간은 최소 48시간 이상을 실시해야한다. 추가적으로 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. 또한 솔수염하늘소는 먹이충분조건으로 건강한 상태를 유지했을 경우 재실험해도 같은 탈출 행동을 보여준다.

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

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

Section 70 × 70mm with length 140mm	Yes	10	0	0	0	0.0	10
	No	10	0	0	0	0.0	10

Table 3. 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 48h	Death before escape
			12	24	36	48		
15	20	21.89	20	20	20	20	100	0
25	20	21.80	14	20	20	20	100	0
30	20	22.17	6	18	18	18	90	2
45	20	21.97	0	1	2	2	10	18
50	20	22.10	0	0	0	0	0	20

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	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).

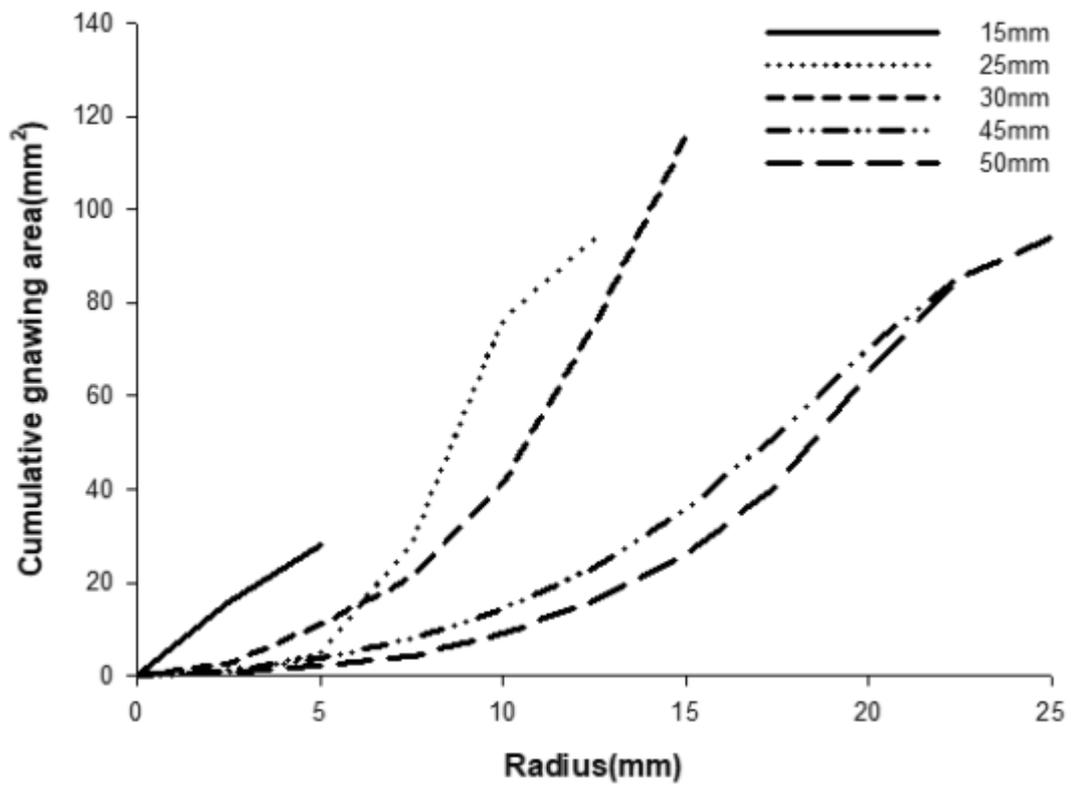


Fig. 7. The cumulative gnawing area 5 radius of *M. alternatus* adults according to to the diameter of cage at 25°C in the laboratory.

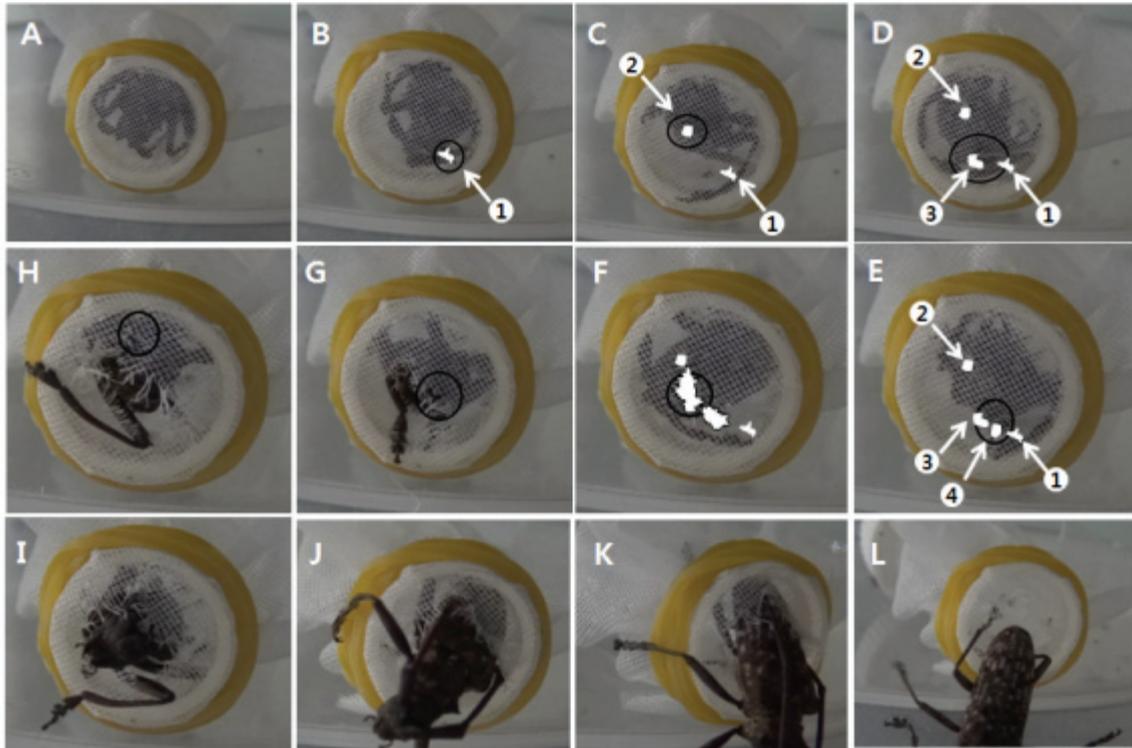


Fig. 8. Cumulative scale of gnawing traces of *M. alternatus* in confined space. A typical example for a serial behavior of *M. alternatus* adults which shows whole length of behaviors during gnawing and escaping behaviors in a confined cage environment at 25°C. The number of ① indicates the first attack 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.

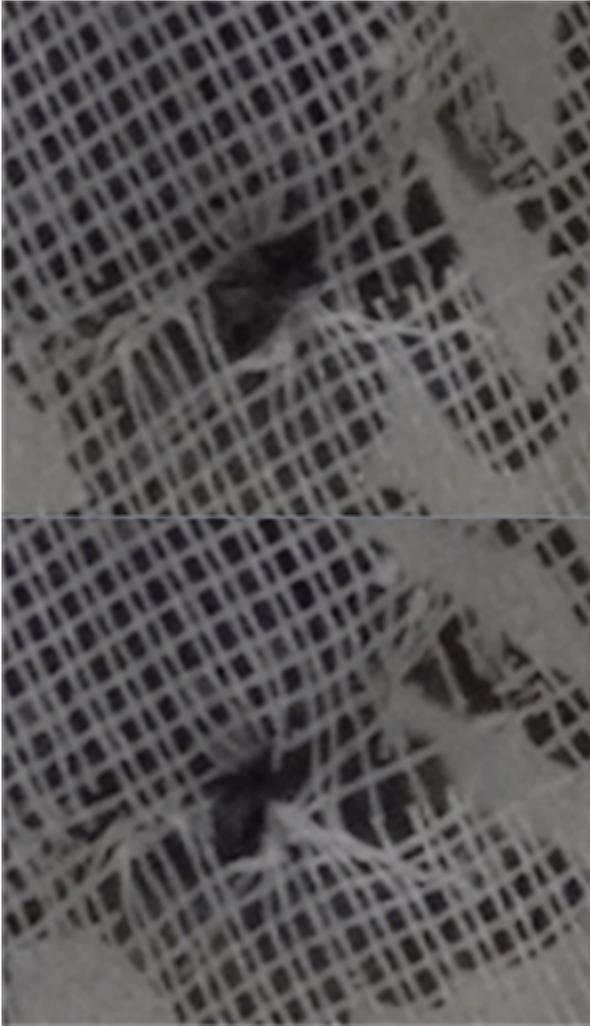
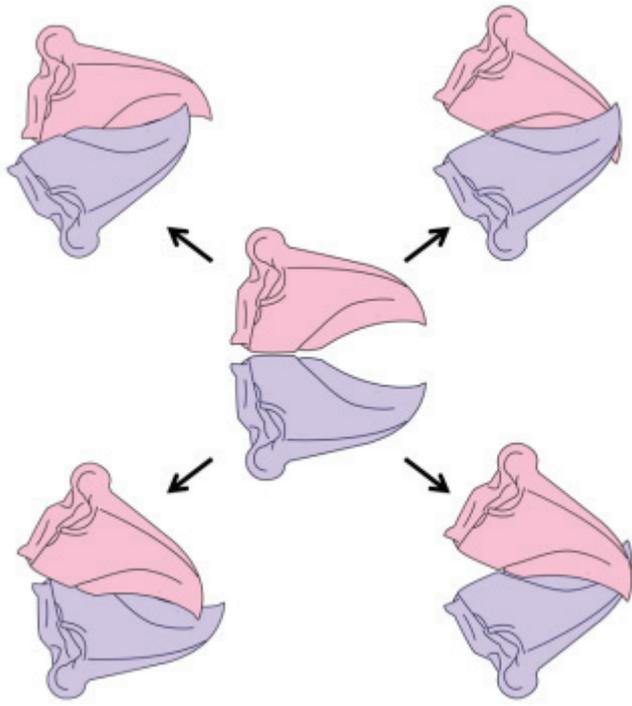


Fig. 9. The staggered movement of the *M. alternatus* adult's mandible. Both mandibles can move independently and has tear-off action.

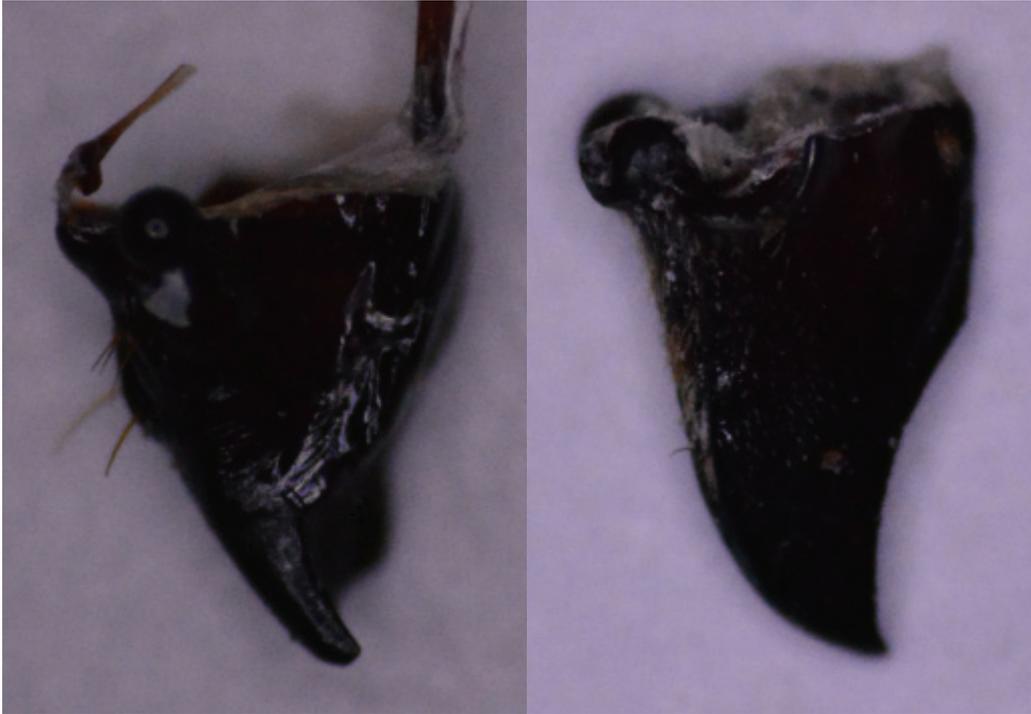


Fig. 10. Form of larva's mandible and adult's mandible. both have jaw joints and the tip is hooked but larvae have denticle in the middle part.



Fig. 11. The ankertrass *M. alternatus* adults. Unlike the ankertrass of the larva of Fig. 2, the particles are small and short.

2. 솔수염하늘소의 온도별 섭식면적 측정 결과

실내항온조건(15, 20, 25, 30, 35 ± 0.5℃)에서 소나무 신초를 먹인 성충의 총 섭식면적과 일평균 섭식면적 그리고 수명을 비교한 결과는 Table 5 와 같았다. 온도조건에서의 총 섭식면적과 일평균 섭식면적은 통계적으로 유의미한 영향을 주었다(M df = 4, 25 F = 21.37 P < 0.0001 ; F df = 4, 25 F = 21.37 P < 0.0001 ; Total df = 4, 61 F = 60.14 P < 0.0001) 15, 20, 25, 30, 35 ℃ 조건에서 최대 섭식 면적은 각각 1969, 6570, 9622, 8762, 8168 이다. 15 ℃ 의 조건에서는 수명 기간동안 적은 면적을 섭식하였으나 20℃부터 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 12). 또한 20~30 ℃ 의 조건에서는 온도가 상승할 때마다 평균적으로 섭식면적이 약간 증가하는 것을 볼 수 있었으나 통계적으로 의미가 없음을 보였다. 집구의 효과(암수간의 섭식 면적 변화량 차이)는 유의하지 않았다(15 df = 11 t = 0.86, P = 0.4102 ; 20 df = 12 t = -1.40 P = 0.1869 ; 25 df = 11 t = -1.54 P = 0.1519 ; 30 df = 11 t = 0.48 P = 0.6437 ; 35 df = 11 t = 1.83 P = 0.0939). 솔수염하늘소가 15℃의 조건에서는 수명기간동안 적은 양을 섭식함으로써 생육 활동에 지장을 줄 수 있다는 것을 알 수 있고, 20 ~ 35℃의 조건에서는 수명기간 동안 총 같은 양의 섭식행동을 하는 것을 알 수 있었다. 또한 암컷의 경우에만 35℃에서 유의미하게 섭식면적이 늘어난 것을 확인 할 수 있었다. 35℃ 구간은 솔수염하늘소의 일 섭식량이 많고 수명이 급격하게 줄어드는 곳이라 암컷의 교미를 위한 양분 섭취와 관련이 되었다 유추한다. 그러나 솔수염하늘소의 돌연사가 많았던 구간으로써 실험 도중에 교체되어 새로 시작한 실험구들이 많으므로 추가적인 표본을 통한 조사가 필요하다. 일평균 섭식면적 또한 통계적으로 유의미한 영향을 주었다(Daily df = 4, 61 F = 376.64 P < 0.0001). 15, 20, 25, 30, 35 ℃ 매일 먹이를 교체해 주지 않았으므로 일평균 최대 섭식 면적은 알 수 없었으나 평균적으로 15~35 ℃ 의 조건에서 온도가 증가할수록 일평균 섭식면적이 큰 차이로 증가한다는 것을 알 수 있었다.

또한 온도조건은 통계적으로 유의미하게 솔수염하늘소의 평균 수명에 영향을 주었다(Lifespan df = 4, 61 F = 178.04 P < 0.0001). 15, 20, 25, 30, 35 ℃에서 평균적으로 각각 128.9, 120.4, 85, 72.6, 42 일 동안 생존하였다. 15~20℃에서는 수명

의 차이가 통계적으로 크지 않았으나 20~35℃에서는 일정한 비율로 수명이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 수명실험에서 솔수염하늘소는 15℃에서 최대 139일까지 생존하였다. 같은 15, 20, 25, 30, 35 ℃ 조건과 같은 항온기에서 교미된 조건의 암컷 성충이 각각 141.1, 122.2, 86.7, 69.7, 31.9 일 동안 생존하였고 15℃에서 최대 188일간 생존한 결과(Kwon, 2017)와는 차이가 있었다. 이는 실험처리의 차이점인 실험구의 사육장 크기와 습도 조건 그리고 암수의 교미여부에 대한 차이의 결과라 볼 수 있다. 또한 20 ~ 35℃의 조건에서는 수명과 일평균 섭식량은 대체적으로 반비례 관계를 가지고 있다.

Table 5. Gnawing range (mm²) and lifespan of *M. alternatus* according to temperature in the laboratory

Temperature (°C)	n		Area of pine shoots gnawed (mm ²)				Lifespan		
	M	F	M	F	Total	Daily			
15	5	8	1009.6±48.12a ¹	NS ²	1150.3±93.36a	NS	1096.2±79.03a	8.52±0.58a	128.85±2.45a
20	7	7	5695.7±113.86b	NS	5247.4±195.77b	NS	5471.6±165.94b	45.50±0.98b	120.43±3.24a
25	7	6	6555.4±505.46b	NS	5183.0±357.67b	NS	5922.0±469.10b	68.86±4.22c	85±2.83b
30	6	7	6193.5±420.00b	NS	6501.7±210.61b	NS	6359.5±312.48b	87.59±2.52d	72.62±2.82c
35	6	7	5898.0±134.88b	NS	6770.0±296.44c	NS	6367.5±259.36b	151.95±3.60e	42±1.58d

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

² The means with same NS case letters in a row of each others are not significantly different by T test (P<0.05).

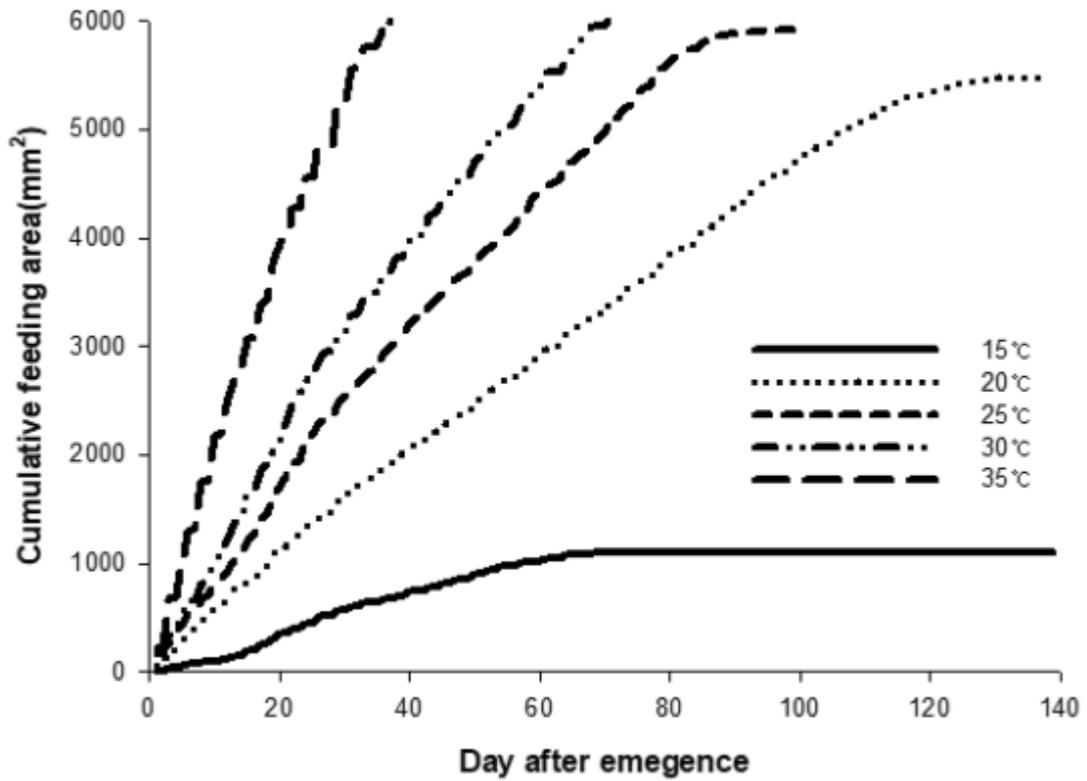


Fig. 12. The cumulative feeding area of *M. alternatus* adults per day according to temperature.

V. 적 요

본 연구는 솔수염하늘소의 쫓기와 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℃에서는 탈출에 성공하지 못하였으며, 20 ~ 30℃ 범위에서 탈출 성공률이 높았다. 좁은 공간에 구속되지 않는 경우는 값은 부위가 집중되지 않아 탈출공을 형성하지 못하였으며 어느 정도 균열이 생겨도 탈출행동을 하지 않았다. 구속된 공간에서 솔수염하늘소는 가운데와 뒷다리 부절을 이용해 좁은 공간에서 몸을 이동시키며 큰턱으로 정면에 있는 장애물을 집중적으로 갇아서 탈출공을 만들고 앞다리를 뺏어 몸을 지탱하면서 빠져나오는 행동을 보였다. 본 연구의 결과는 훈증 대체기술로 제시되고 있는 구속 그물망의 성능을 평가하는데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

또한 솔수염하늘소가 가장 활동량이 많은 시기를 구명하기 위해 온도를 달리 처리하여 섭식 면적과 평균 수명을 조사하였다. 솔수염하늘소는 15℃에서 가장 수명이 길었으나 수명기간동안 총 갇은 면적이 많지 않았다. 수명과 일일 평균 섭식 면적의 관계는 20 ~ 35℃ 범위에서 반비례 상관관계를 보였으며 결과적으로 20℃에서는 일일 섭식 면적이 적고 수명이 짧아졌으며 35℃에 가까울수록 짧은 수명 안에 넓은 면적을 가해하는 차이를 보인다. 이에 따라 본 연구 결과를 통해 온도 환경에 따른 관리 옵션을 용이하게 하는데 유용할 것이다.

VI. 인용 문헌.

- 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.
- Chida, T. and Sato, H. 1981. Adult occurrence time of *Monochamus alternatus* in Ichinoseki, Iwate Prefecture. The Transactions of the meeting of the Tohoku Branch of the Japanese Forest Society. 33: 144-145.
- Edwards, O.R., Linit, M.J., 1992. Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* through oviposition wounds of *Monochamus carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Nematol.* 24, 133-139.
- Furuno, T. and K. Uenaka. 1979. Studies on the insect damage upon the pine-species imported in Japan(No. 6) on the feeding of Japanese pine sawyer adult, *Monochamus alternatus* Hope. The Bulletin of the Kyoto University of Forests. 51: 12-22.
- Hoshizaki, K., S. Sano, H. Sakuraba, N. Tabuchi, M. Yoshida, Y. Oikawa and K. Kobayashi. 2005. A practical protection from pine-wilt disease through conversion of infected trees to charcoal: strategy for reduction of disease-vectors

and a case for a coastal pine forest, northern Japan. *Tohoku Journal of Forest Science*. 10: 82-89

Irei, H., T. Miyagi, Y. Gushilken, Y. Nakahira, T. Mori, N. Kameyama, K. Nakamura, M. Akiba, N. Sahashi and M. Ishihara. 2004. Epidemiology of pine wilt disease in Ryukyu pines in Okinawa island IV. Number of adult occurrence and its prevalence of *Monochamus alternatus* in Okinawa island. *The Transactions of the Meeting of the Japanese Forest Society*. 115: 719.

Jeong, H.S. 2015. Studies on the Damage Analysis and Effective Control System of Pine Wilt Disease in Korea. PhD. Thesis. Sangji University. pp. 71-75.

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, B. S., 2016. Changes in foraging behaviours depending on the nectar source temperature in the Asiatic honey bee, *Apis cerana*: experimental study. M. thesis. Incheon National University, pp. 26-27.

Kim, D. S., 2000. A study on the correlation between the oviposition behavior of *L. puziloi* and the leaf biomass of hostplant. M thesis, Gyeongsan University, pp. 7-14.

Kim, D. S., 2003. Ecological characteristics of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. MS thesis, Gyeongsang

National University., 56 pp.

Kim, D. S., 2010. Ecology of and Control Agents Screening against Japanese Pine Sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) and Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Aphelenchida: Aphelenchoididae). PhD. Thesis. Gyeongsang National University, pp. 29-35.

Kim, D. S., S. M. Lee, Y. J. Chung, K. S. Choi, Y. S. Moon and C. G. Park., 2003. Emergence ecology of Japanese Pine Sawyer. *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), a vector of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Korean Journal of Applied Entomology. 42(4): 307-313.

Kim, J. E., 2007. Effects and tasks of fumigation. Seoul National University., Bulletin of the Seoul National University library 129, 23-42. (The title was translated to English by authors of this paper)

Kim, K. B., 2015. A Forecasting Model for the Adult Emergence of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in Jeju. M. Thesis. Jeju National University. 28 pp.

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)
- Kwak, I.C., 2003. Persistence and Extractability of Insecticide Endosulfan in Representative Soils of Jeju Island. M. Thesis. Jeju National University. pp. 3-18.
- Kwon, H.J., 2013. Change of behavioral thermoregulation and food intake in captive oriental storks(*Ciconia boyciana*) in relation to seasonal change. M. Thesis. Korea National University of Education. pp. 21-26.
- Kwon, S.H., 2017. A population model of *Monochamus alternatus* (Coleoptera:Cerambycidae): Temperature-dependent development, oviposition and phenology modeling. PhD. Thesis. Jeju National University. 39 pp.
- Kwon, T. S., J. H. Lim, S. J. Sim, Y. D. Kwon, S. K. Son, K. Y. Lee, Y. T. Kim, J. W. Park, C. H. Shin, S. B. Ryu, C. K. Lee, S. C. Shin, Y. J. Chung and Y. S. Park., 2006. Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. Journal of Korean Forest Society. 95: 543-550.
- Lee, S. H., J. O. Lim, D. P. Lyu, K. S. Choi, Y. J. Jeong, and S. C. Shin., 2006. A taxonomic note on *Sclerodermus harmandi*, ectoparasite of stem and wood boring insect larvae (Hymenoptera: Chrysidoidea:Bethylidae) in south Korea. J. Asia-Pacific Entomol. 9(2): 115-119.

- Lee, S. M., Y. J. Chung, Y. S. Moon, S. G. Lee, D. W. Lee, H. Y. Choo, and C. K. Lee. 2003. Insecticidal activity and fumigation conditions of several insecticides against Japanese Pine Sawyer(*Monochamus alternatus*) Larvae. Forest Society 92: 191-199.
- Lee, S. M., 2013. Home range, diet, and crop damage of wild boar (*Sus scrofa*) in Geochang county, Gyeongnam, Korea. M. Thesis. Seoul National University. 57 pp.
- Lee, S. M., Y. J. Jeong, I. S. Moon, S. G. Lee, D. W. Lee, H. Y. Choo and C. K. Lee., 2003. Insecticidal Activity and Fumigation Conditions of Several Insecticides against Japanese Pine Sawyer (*Monochamus alternatus*) Larvae. J. Korean Forest Soc. 92: 191-198.
- Maeta, Y. and Kitamura. 2003. Host record and some biological notes on the bethylid wasp, *Sclerodermus* sp.(Hymenoptera: Bethyridae). Jpn. J. Syst. Entomol. 9: 263-265
- Mamiya, Y. and N. Enda. 1972. Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* (Nematoda: Aphelenchoidae) by *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). Nematologica. 18: 159-162.
- Monro, H.A.U., 1984. Manual of fumigation for insect control. FAO., pp. 78-326.
- Moon, I.S., S. M. Lee, J. D. Park and W. H. Yeo. 1995. Distribution and control of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* and its vector Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*. KFRI Journal of Forest Science. 51: 119-126.

- Morimoto, K., Iwasaki, A., 1974. Studies on the pine sawyer (X). Number of larval instars. Trans. 85th Ann. Meet. Jpn. For. Soc. 227-228.
- Nakamura, K., Okochi, I., 2002. Longevity and ovarian status of the adult *Monochamus alternatus* Hope fed on non-pine three species. J. Jpn. For. Soc. 84: 21-25.
- Park, C. G., D. S. Kim, S. M. Lee, Y. S. Moon, Y. J. Chung and D. S. Kim. 2013. A forecasting model for the adult emergence of overwintered *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae based on degree-day in Korea. Appl Entomol Zool. 49: 35-42.
- Park, N. C., Y. S. Moon, S. M. Lee, J. D. Park and K. S. Kim. 1992. Effects of temperature on the development of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). Research Report of Forest Research Institute. 44: 151-156.
- Seo, B.S., 2007. The development of pine wilt disease (*Bursaphelenchus Xylophilus*) prevention system. MS thesis, Chonbuk National University, pp. 11-14.
- Son, J. G., 2009. Development of New Bio-Active Chemicals for Bilateral Control of Pine Wood Nematode and Its Vector, Japanese Pine Sawyer. M. thesis. Gyeongsang National University. pp. 48-49.
- Song, S., L. Zhang, H. Huang and X. Cui. 1991. Preliminary study of biology of *Monochamus alternatus* Hope. Forest Science and Technology. 6: 9-13.
- Togashi, K. and H. Magira. 1981. Age-specific survival rate and fecundity of the

adults Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope (Coelopter: Cerambycidae), at different emergence times. Japanese Society of Applied of Entomology and Zoology. 16: 351-361.

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 National University, pp. 95.

Yoon, S.R., 2008. A study on the selective control of pine wilt disease and utilization of damaged trees. Ph.D Thesis, Gyeongsang National University, pp. 95.

Xu, F., M. Ge, K. Xu, P. Zhang and C. Xie 2004. Studies on the techniques of integrated management to PWN in Jiangsu. In international Symposium. Ecology and management of pine wilt disease. Korea forest research institute, 7-9, 2004, Seoul. pp. 63~75.

감 사 의 글

논문을 마무리하며 군에서 막 전역해서 복학하기 전에 동원이형에게 끌려가며 교수님을 찾아뵈며 이곳에서 연구를 시작했던 일이 생각납니다. 아무것도 잡히지 않던 상황에서 여기까지 오게 된 일들을 다시 한 번 되돌아보게 되니 대학원에 서 있는 동안 저에게 축복과 같은 일들이 너무나 많이 벌어졌습니다. 이제 새로운 시작이지만 지난 기간 절 도와주시고 저를 위해 기도해주시고 응원해주시던 많은 분들을 직접 찾아뵙지는 못하지만 감사의 마음을 글로 남깁니다.

우선 아무것도 제대로 못하고 부족했던 저를 거두어 주시고 힘들 때 붙잡아주시고 여기까지 이끌어주신 김동순 교수님 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 전심으로 주재해 주시고 저 때문에 고통 받으셨던 김주성 교수님 그리고 같이 심사하셨던 현해남 교수님 감사드립니다. 심사 기간 동안 작은 것 하나 신경 써 주시고 질문해주시던 전용철 교수님과 정용석 교수님, 대학원 기간 동안 가르침을 주셨던 송창길 교수님께도 감사드립니다.

학부생 때부터 절 알아봐주고 챙겨주고 키워주던 동원이형, 같이 고생하고 응원했던 하나누나, 실험실에서 제 길이 맞다 잡아주시고 대학원 생활 가장 큰 도움이 되었던 수빈이 누나, 만날 때마다 항상 잘 될 거라 응원하시던 현승용 선생님, 실험실에서 바쁘게 일하시던 권순화 선생님, 정훈이형, 태욱이형, 성오형, 같이 고생했던 명수와 건이형, 그리고 상희, 진우, 희정이 모두 감사합니다.

또한 파트 타임으로 전환된 동안 제 길을 이끌어주시고 함께 해 주신 제주자연생태공원 김은미 소장님, 강창완 선생님 그리고 응원해주신 제주자연생태공원 직원 여러분 진심으로 감사드립니다.

그리고 학부 시절 때부터 영적 스승이며 대학원을 결정 할 때 마음잡아 주시고 항상 저를 위해 기도해주신 이상준 간사님, 가장 큰 힘이 되고 같이 기도해준 동일이와 상동이를 포함한 제주CCC 형제자매님들 그리고 역시 학생 시절부터 저와 함께 해준 소나이즈 선수단 여러분들께도 다시 한 번 감사드립니다.

마지막으로 어떤 일이 있어도 항상 믿어주시고 기다려주시던 우리 아버지와 매일 아침 일찍 도시락을 챙겨주며 뒷바라지 해준 우리 어머니 그리고 응원해준 누나와 매형 모두 사랑합니다.