

Note

<https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.4.554>

Korean J. Environ. Biol.

38(4) : 554-562 (2020)

ISSN 1226-9999 (print)

ISSN 2287-7851 (online)

목질을 천공하는 얼룩송곳벌(*Tremex fuscicornis*)과 밀드리좀벌(*Leucospis japonica*) 산란관의 형태적 특징 비교

김지영, 박지현, 권오창¹, 김진희*

국립생태원 생태정보연구실 생태모방연구팀, ¹국립생태원 기후생태연구실 기후변화연구팀

A comparative study of the morphology of the ovipositors of wood-boring insects, *Tremex fuscicornis* and *Leucospis japonica*

Ji Yeong Kim, Ji-Hyun Park, Oh Chang Kwon¹ and Jinhee Kim*

Biomimicry Team, Division of Ecological Information, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

¹Team of Climate Change Research, Division of Climate and Ecology, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

*Corresponding author

Jinhee Kim

Tel. 041-950-5625

E-mail. jkim@nie.re.kr

Received: 6 October 2020

Revised: 4 November 2020

Revision accepted: 5 November 2020

Abstract: *Tremex fuscicornis* (Siricidae), known as the xylophagous horntail, and *Leucospis japonica* (Leucospidae), known as the parasitoid wasp, are wood-boring wasps belonging to the order Hymenoptera. These insects are interesting sources of biological inspiration for the development of drilling mechanisms. To study the biomimicry aspects, the morphological characters of the ovipositor of *T. fuscicornis* and *L. japonica* were analyzed using a stereoscopic microscope, a field emission scanning electron microscope, and an optical microscope. There were many differences in the ovipositors between the two species, such as shape, length, surface structure, and arrangement of the teeth. Evenly arranged teeth were developed at the tip of both the dorsal valve and the ventral valve of the ovipositor of *T. fuscicornis* and looked like a rotating drill bit. In contrast, in *L. japonica*, the teeth, which looked like a saw, were found only on the ventral valve. Moreover, the tip of the ovipositor of *T. fuscicornis* was symmetrically divided into four parts, while that of *L. japonica* was divided into three parts having a 2:1:1 ratio. However, in the case of *T. fuscicornis*, after the 14th tooth, four parts melded into three parts maintaining a 2:1:1 ratio, and a dovetail joint was found on the horizontal cross-section of the ovipositor that allowed vertical movement for making a hole. These morphological differences of the ovipositor may be due to the insects' lifestyles and phylogenetic distance. Finally, zinc was commonly found at the tip of the ovipositors of both species, a probable result of ecological adaptation created by drilling wood.

Keywords: biomimicry, Leucospidae, ovipositor, Siricidae, wood-boring

서 론

얼룩송곳벌 (*Tremex fuscicornis*)은 벌목(Hymenoptera) 송곳벌과(Siricidae)에 속하는 종으로 주로 한국, 일본, 사할린, 시베리아 및 유럽에 분포한다. 송곳벌과(Siricidae)에 속하는 종들은 대부분 크고 날카로워 보이는 산란관 때문에 Horntail 또는 wood wasp이라고 불리며, 전 세계적으로 11속 111종이 알려져 있고, 한국에는 5속 14종이 서식하는 것으로 보고되어 있다(National Institute of Biological Resources 2019; Park et al. 2020). 송곳벌과에 속하는 대부분의 종들은 목질부를 천공하는 특징을 보인다(Schiff et al. 2012). 송곳벌과의 유충은 곰팡이와 공생하며, 나무를 식해하는 식식성(phytophagy) 해충으로 잘 알려져 있다(Lee 1998). 일반적으로 몸길이가 25 mm 이상으로 대형종에 속하며, 암컷은 산란관이 배 말단에서 10 mm 정도 밖으로 튀어나와 있어 수컷과 뚜렷이 구별된다. 암컷은 커다란 산란관을 이용해 수목을 직각으로 천공해 알을 낳으며, 단풍나무속(*Acer* sp.), 오리나무속(*Alnus* sp.), 자작나무속(*Betula* sp.), 서어나무속(*Carpinus* sp.), 팽나무속(*Seltis* sp.), 너도밤나무속(*Fagus* sp.), 가래나무속(*Juglans* sp.), 사시나무속(*Populus* sp.), 뽕나무속(*Prunus* sp.), 중국굴피나무속(*Pterocarya* sp.), 아까시나무속(*Robinia* sp.), 버드나무속(*Salix* sp.), 느릅나무속(*Ulmus* sp.) 및 느티나무속(*Zelkova* sp.) 등 다양한 수종에 서식하기 때문에 기주특이성이 높지 않은 것으로 알려져 있다(Forest Research Institute 1969; Lee 1998).

밀드리좀벌(*Leucospis japonica*)은 벌목(Hymenoptera) 밀들이좀벌과(Leucospidae)에 속한다. 밀들이좀벌과에 속하는 종들은 일반적으로 절지동물(arthropods)의 몸 위나 안에 알을 낳는 기생성벌(parasitoid wasp)로 알려져 있다. 전 세계적으로 4속 150종이 알려져 있고, 국내에는 1속 3종이 보고되어 있는데, 밀드리좀벌(*Leucospis japonica*), 짧은밀들이벌(*L. sinensis*), 꼬마밀들이벌(*L. yasumatsui*) 3종이 이에 속한다(Kim et al. 2017a; Park et al. 2018; NIBR 2019). 특히, 밀들이좀벌과(Leucospidae)는 좀벌상과(Chalcidoidea) 내에서도 산란관이 배부분에 엮어져 있는 독특한 형태를 가지는 등 형태적, 생물학적으로 구별되는 특징을 갖는다(Hesami et al. 2005). 밀드리좀벌은 몸길이 11~12.8 mm로 꿀벌과 비슷한 크기인 소형종이며, 꿀벌과(Apidae)와 가위벌과(Megachilidae)의 유충에 기생하는 것으로 알려져 있다(Torretta et al. 2017). 기생숙주가 육아방(brood cell)을

만들면, 밀드리좀벌은 산란관을 이용해 목질을 천공해 그곳을 공격한다(Cooperband et al. 1999; Gazola and Garofalo 2003).

곤충의 다양한 형태적 특징 및 기능은 생태모방의 한 부분으로 많은 연구가 이루어져 왔다(Kim et al. 2017b; Kim et al. 2019). 그러나 곤충의 목질부 천공기능과 관련하여 산란관의 형태적 특성 분석에 관한 연구는 미미하였다. 본 연구의 대상종인 얼룩송곳벌과 밀드리좀벌은 목질을 직각으로 천공하며, 산란관을 끝까지 집어넣어 깊게 천공하는 독특한 산란 습성이 있어, 다른 분류군에 비해 천공에 특화된 산란관 형태를 보여준다. 또한, 얼룩송곳벌과 밀들이좀벌은 같은 벌목(Hymenoptera) 내에서도 진화적으로 분류학적 유연관계가 멀리 떨어져 있음에도 불구하고, 깊게 천공하는 유사한 특성을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 얼룩송곳벌(*T. fuscicornis*)과 밀드리좀벌(*L. japonica*)의 산란관의 형태적 특징 및 기능 분석 등 생물·생태 특성을 이용하여 생태모방연구로의 적용가능성을 확인하고(Bae et al. 2019), 자연이 만들어낸 천공에 특화된 구조를 관찰하고 특성을 찾아 삶에 유용한 기술로 발전시킬 토대를 마련하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상종 확보

얼룩송곳벌은 국립생태원 내에서 분양 받은 표본 1개체와 2019년부터 2020년까지 2년간 새로 채집한 개체를 이용하여 형태적 분석을 진행하였다(Fig. 1A). 얼룩송곳벌 채집을 위해 2년의 연구 기간 동안(2019~2020년) 얼룩송곳벌 서식지로 알려진 수원 광교저수지, 광교산, 충주 살미면, 여수 영취산 및 돌산공원을 조사하였으나, 실제로 서식 확인 및 채집이 이루어진 곳은 여수 돌산공원(전남 여수시 돌산을 우두리 794-88번지, 34°43'49.8"N 127°44'24.3"E)이 유일했다. 돌산공원에 위치한 수많은 수종 중 특정 지점에 있는 팽나무 몇 그루에서만 다량의 탈출공 및 산란 흔적이 발견되었고, 그곳에서 얼룩송곳벌이 집중적으로 채집되었다. 30개체가 넘게 채집되었으며, 그 중 암컷 10개체를 선별해 분석을 진행하였다.

밀드리좀벌은 Malaise Trap을 이용해 2019년 국립생태원 원내에서 채집된 암컷 6개체와 6월 강원도 영월에서

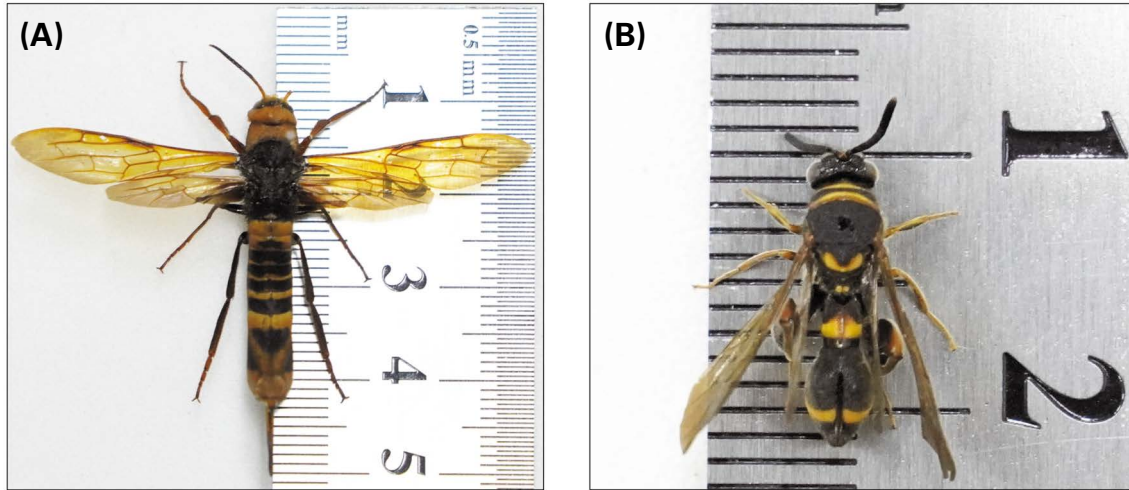


Fig. 1. Species used in this study. (A) *Tremex fuscicornis* and (B) *Leucospis japonica*.

채집된 암컷 4개체를 이용하여 분석을 진행하였다(Fig. 1B). 밀드리즘벌의 채집을 위해 목재로 지어진 건축물을 찾아 가위벌 등 밀드리즘벌의 숙주를 먼저 찾은 후 산란을 위해 모여든 밀드리즘벌을 포충망을 이용해 채집하였다.

2. 실체현미경 관찰

얼룩송곳벌과 밀드리즘벌 샘플은 채집 후 95% EtOH에 침지해 고정 및 건조를 시켰으며, 산란관 형태 관찰을 위해 산란관 덮개를 해제한 후 산란관을 몸통과 분리시켰다. 이후 산란관 외부에 부착되어 있는 불순물의 세척을 위해 초음파세척기로 약 10분간 처리하여 불순물 제거 후 관찰하였다. 관찰에 이용한 실체현미경은 Leica M205C (Leica Microsystems, Germany)이며, 10~20배 확대하여 관찰하였다. 산란관의 직경은 산란관이 말단의 날카로운 부분부터 점점 두꺼워지다가 두께가 일정해지는 지점까지 약 100 μm 단위로 약 20회 측정하였다. 현미경 사진은 DMC6200 Digital Color Microscope Camera (Leica Microsystems, Germany)을 이용하였으며, 정확한 길이 측정을 위하여 ImageJ software (Image Processing and Analysis in Java by <http://imagej.nih.gov/ij/>)를 이용하였다.

3. 전계방사형주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) 관찰 및 성분분석(Energy Dispersive Spectroscopy)

얼룩송곳벌과 밀드리즘벌의 산란관 덮개를 제거하고 산

란관을 분리한 후 95%EtOH에 침지해 건조 및 고정 작업을 하였다. 이후 산란관 외부에 부착된 불순물 제거를 위해 계면활성제를 소량 희석한 증류수에 침지해 약 10분간 초음파세척을 하였다. 세척이 끝난 산란관을 상온에서 완전히 건조시킨 후 관찰하고자 하는 방향이 위쪽으로 향하도록 Stub에 고정하였다. 이후 백금을 이용하여 5분간 이온증착시킨 후 관찰하였다. 관찰 방향은 등쪽(dorsal), 배쪽(ventral), 말단 방향에서 관찰하였으며 얼룩송곳벌 산란관은 50~300배, 밀드리즘벌 산란관은 200~500배 확대하여 관찰하였다. 산란관의 위치에 따른 구성성분의 차이를 알아보기 위해 FE-SEM에 부착되어 있는 EDS (EX-250, HORIBA, Kyoto, Japan)을 이용하여 성분 원소를 분석하였다.

4. 광학현미경 관찰

얼룩송곳벌의 산란관 단면 및 내부 구조를 파악하기 위해 절편을 제작하고, 염색한 후에 광학현미경으로 관찰하였다. 절편 제작은 Glutaraldehyde와 Osmic acid를 이용하여 고정시키고, 50~100%의 EtOH을 이용하여 여러 번의 탈수 작업을 진행하였다. 이후 propylene oxide를 이용해 치환하고 EPOK 812를 이용해 포매 및 건조하여 블록을 완성하였다. 완성된 블록은 다이아몬드 나이프로 박질하여, methylene blue로 염색한 후 광학현미경(ZEISS Axio Lab.A1, Germany)을 이용하여 형태적 특징을 관찰하였다.

결과 및 고찰

1. 실체현미경을 이용한 산란관 형태 비교 분석

실체현미경을 이용하여, 산란관덮개를 제거한 두 종의 산란관을 관찰하였다(Fig. 1). 실제 목질부를 천공하는 두 종의 산란관 말단을 관찰한 결과, 얼룩송곳벌 산란관의 경우 말단에서부터 작은 돌기가 규칙적인 모양과 간격으로 튀어나와 있어 나사못이나 회전형 드릴 비트와 흡사한 형태를 나타내었다(Fig. 2A). 그에 반해 밀드리좀벌의 산란관 말단은 한쪽 방향에만 몇 개의 돌기가 있고 다른 부분은 매끄러워 마치 톱과 비슷한 형태를 보였다(Fig. 2B). 또한, 얼룩송곳벌 산란관의 경우 말단에서 보인 규칙적인 돌기가 중단부까지 규칙적인 배열(Fig. 2C)로 이어져 있는 반면, 밀드리좀벌 산란관의 경우 중단부가 얼룩송곳벌과는 다르게 아주 매끄러운 표면구조를 나타내었다(Fig. 2D). 외부 형태뿐만 아니라 산란관의 직경에서도 많은 차이를 보였다. 얼룩송곳벌 산란관의 평균 직경은 $275 \pm 7.23 \mu\text{m}$ 로 측정되었고, 밀드리좀벌 산란관의 평균 직경은

$80.1 \pm 4.43 \mu\text{m}$ 로 얼룩송곳벌에 비해 다소 얇았으며, 두 종 간 약 3배의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 얼룩송곳벌과 밀드리좀벌은 산란을 할 때 산란관을 이용해 단단한 목질을 깊이 천공한다는 공통점이 있지만 산란관의 직경은 물론 돌기의 형태 및 배열 등의 외부 형태에서도 상당히 많은 차이를 확인할 수 있었다.

식식성인 얼룩송곳벌의 경우 목질 안쪽의 여러곳에 산란하는것을 목적으로 천공을 하기 때문에 빠른 천공에 특화된 형태이며, 기생성 벌인 밀드리좀벌은 목질을 천공한 후 가위벌류의 산란방에 도달해 탁란을 하는 것이 목적이기 때문에 정확하고 예리한 천공에 적합한 형태를 하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

2. 전계방사형주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM)을 이용한 산란관 형태 비교

얼룩송곳벌과 밀드좀벌 산란관의 말단을 전계방사형주사전자현미경으로 관찰한 결과 실체현미경을 통해 확인

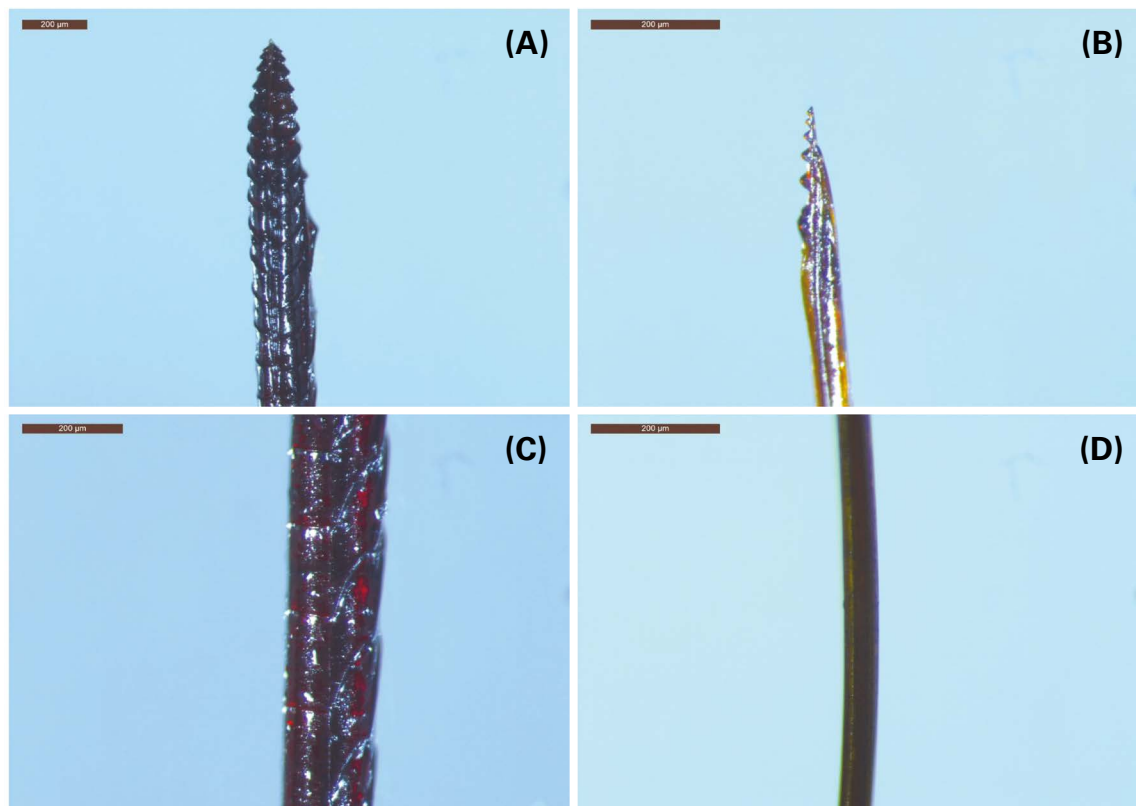


Fig. 2. Ovipositor observed by stereoscopic microscope. (A) Tip of the ovipositor of *Tremex fuscicornis*, (B) tip of the ovipositor of *Leucospis japonica*, (C) middle of the ovipositor *T. fuscicornis*, and (D) middle of the ovipositor of *L. japonica*. Scale bars = 200 μm .

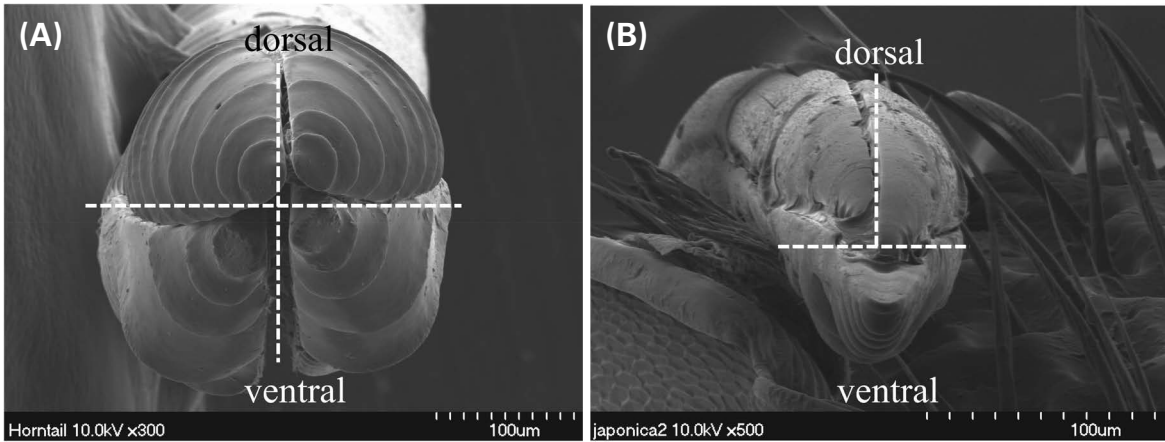


Fig. 3. FE-SEM images of ovipositor tip. (A) *Tremex fuscicornis* and (B) *Leucospis japonica*. Scale bars = 100 µm.

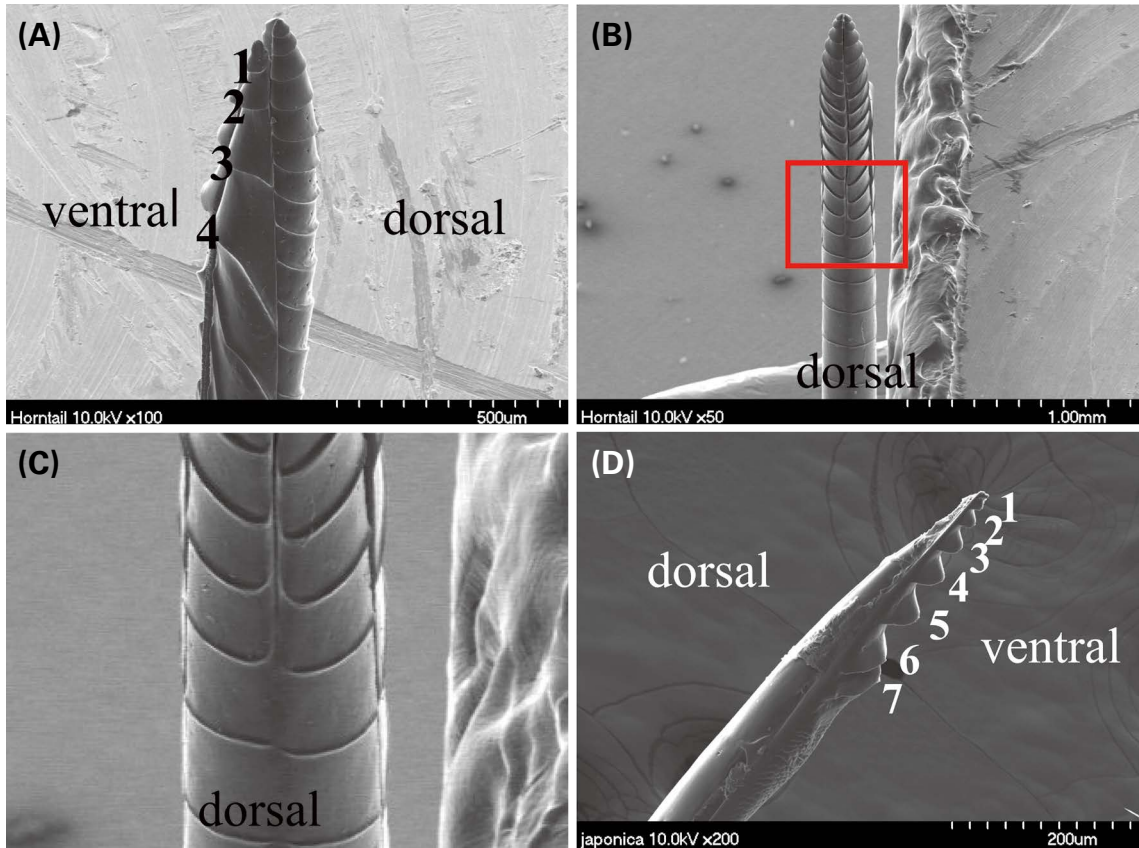


Fig. 4. FE-SEM images of ovipositor bump. (A) *Tremex fuscicornis*, ventral view, (B) *T. fuscicornis*, dorsal view (red square is joint part), (C) enlarged ovipositor joint part of *T. fuscicornis*, and (D) *Leucospis japonica*, ventral view. Scale bars = 500 µm (A), 1 mm (B), and 200 µm (D).

한 형태적 차이와 마찬가지로 말단의 형태가 확연히 다른 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 얼룩송곳벌 산란관의 말단은 대칭적으로 4등분(Fig. 3A)으로 되어있는 반면 밀드리

좀벌 산란관의 말단은 2:1:1의 비율로 3등분(Fig. 3B)되어 있었다. 얼룩송곳벌의 4등분된 말단 부분을 수직방향으로 관찰한 결과, 돌기의 형태 및 배치가 등쪽(dorsal)이

나 배쪽(ventral)이냐에 따라 큰 차이를 보였는데, 배쪽에 있는 돌기는 등쪽에 있는 돌기에 비해 더 크기가 크고, 개수는 적었다. 옆으로 뻗는 돌기의 길이를 보면 등쪽에서 보이는 7개는 평균적으로 $15.8 \pm 7.7 \mu\text{m}$ 씩 커지는 경향을 보였고, 배쪽의 돌기는 4개로 평균적으로 $29.8 \pm 6.52 \mu\text{m}$ 씩 커지는 것으로 확인되었다(Fig. 3).

또한, 전계방사형주사전자현미경을 이용하여, 측면에서 등쪽(dorsal)과 배쪽(ventral)의 모양을 다각도로 관찰한 결과 두 종 간의 형태적 차이를 더 명확하게 확인할 수 있었다(Fig. 4). 얼룩송곳벌 산란관의 경우 배쪽에 위치한 4개의 돌기는 말단에서 중앙부로 갈수록 산란관의 중심축에서 나온 돌기의 높이가 $53.79 \mu\text{m}$, $67.43 \mu\text{m}$, $102.46 \mu\text{m}$, $139.04 \mu\text{m}$ 으로 점점 커지는 것을 확인하였다. 등쪽의 돌기는 배쪽에 비해 상대적으로 작은 크기의 돌기들이 확인되었다. 또한, 등쪽의 14번째 돌기 전까지는 말단이 4등분이었지만(Fig. 4), 그 이후로부터는 밀드리좁벌의 산란관과 마찬가지로 2:1:1의 비율로 3등분으로 나뉘는 것을 확

인할 수 있었다(Fig. 4B, C). 말단에서부터 갈라져 있던 산란관이 등쪽에서 보이는 14번째 돌기를 지나면서 하나로 합쳐지는 것을 확인하였으며, 말단부터 14번째 돌기까지의 길이는 약 $928.4 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 밀드리좁벌 산란관의 말단은 등쪽에서는 돌기가 관찰되지 않았으며, 배쪽에서는 7개의 돌기가 확인되었다(Fig. 4D). 산란관의 중심축에서 나온 돌기의 높이는 말단에서 중앙부로 갈수록 $18.3 \mu\text{m}$, $25.7 \mu\text{m}$, $35.7 \mu\text{m}$, $42.9 \mu\text{m}$, $43.2 \mu\text{m}$, $53.7 \mu\text{m}$ 으로 점점 커짐을 확인할 수 있었다.

산란관의 말단에 특징적으로 나타나는 돌기들은 천공시 목질에 직접적으로 에너지를 전달하는 부위이며, 현대에서 가장 많이 쓰이는 천공 장치인 회전형드릴의 드릴비트(Drill Bit)와 같은 역할을 하는 것으로 보인다. 드릴비트는 천공 효율을 결정하는 중요 요소이므로(Kang *et al.* 2014), 산란관 말단에 위치한 돌기의 형태 및 배열이 천공 기능의 핵심요소 중 하나일 것으로 예상된다.

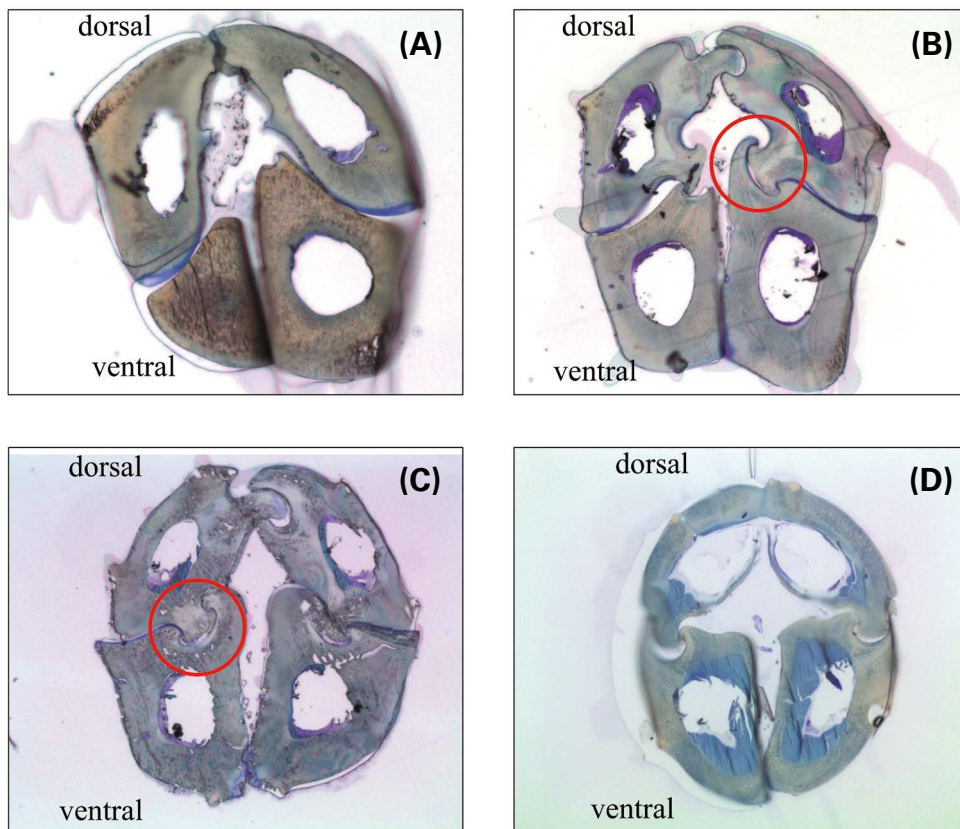


Fig. 5. Internal observation of *Tremex fuscicornis* ovipositor using an optical microscope. (A) Near tip part, (B, C) middle part (red circle is dovetail), and (D) two parts of the dorsal ovipositor joined together.

3. 광학현미경을 이용한 얼룩송곳벌 산란관의 내부 형태 관찰

얼룩송곳벌의 산란관 단면 구조를 관찰하기 광학현미경을 이용하여 촬영하였다(Fig. 5). 산란관의 말단 부분의 단면을 잘라 관찰한 결과 각각 서로 간섭하지 않는 4개의 부분으로 나뉘어져 있는 것을 볼 수 있었으며, 4개의 조각의 중앙부분에는 산란 시 알이 지나갈 수 있는 공간이 확보되어 있었다(Fig. 5A). 산란관의 중앙부분의 단면을 관찰한 결과 말단 부분과 달리 dovetail joint의 구조가 확인되었으며, 각 부분이 서로 간섭하는 모습을 보였다(Fig. 5B, C). 수평방향으로 형성된 dovetail joint 구조는 수평 운동을 억제하고, 미끄럼 이음(sliding joint) 역할을 하여, 송곳벌이 왕복 수직 운동으로 쉽게 목질부를 천공할 수 있도록 도와준다(Vincent and King 1995; Frasson 2010). 14번째 돌기 이후 부분은 실제현미경의 관찰 결과와 마찬가지로 4등분 갈라져 있던 것이 3등분으로 되면서 일부가 합쳐지는 것을 동일하게 확인할 수 있었다(Fig. 5D).

현대에서 사용되는 대부분의 천공기(drilling machine)는 회전력(rotation force) 및 충격력(percussion force)을 이용하여 천공을 한다(Song et al. 2013). 하지만 얼룩송곳벌 및 밀드리좀벌의 산란관을 분석한 결과 다른 메커니즘

인 상하왕복운동을 통한 천공을 하는 것으로 밝혀졌다. 목질 천공에 특화되어 진화한 메커니즘인 만큼 기존의 천공장치보다 효율적인 천공장치의 개발에 기여할 것으로 기대된다.

4. 에너지분산형 분광분석법(Energy dispersive spectrometry)을 이용한 성분분석

얼룩송곳벌과 밀드리좀벌 산란관의 부위별 구조 성분의 차이를 알아보기 위해 성분분석을 진행하였다. 산란관의 부위별 성분분석 결과 모든 부위에서 탄소(C)와 산소(O)가 공통적으로 검출되었다(Fig. 6). 얼룩송곳벌 산란관 말단부분에서는 아연(Zn)이 검출되었으나(Fig. 6A), 산란관 중앙부분에서는 기본적인 탄소와 산소 외에 다른 원소는 검출되지 않았다(Fig. 6B). 밀드리좀벌 산란관도 얼룩송곳벌과 동일하게 말단부분에서 아연이 검출되었으나(Fig. 6C), 중앙부분에서는 아연이 검출되지 않았다(Fig. 6D). 아연은 큐티클로 이루어진 구조에 더 높은 강도를 부여하고, 연마에 의한 마모를 줄이는데 도움이 되기 때문에 일반적으로 단단한 기질을 씹는 무척추동물의 턱에 많이 존재하는 것으로 알려져 있다(Broomell et al. 2006). 벌목(Hymenoptera)에 속하는 곤충들의 경우 일부 과에서 산

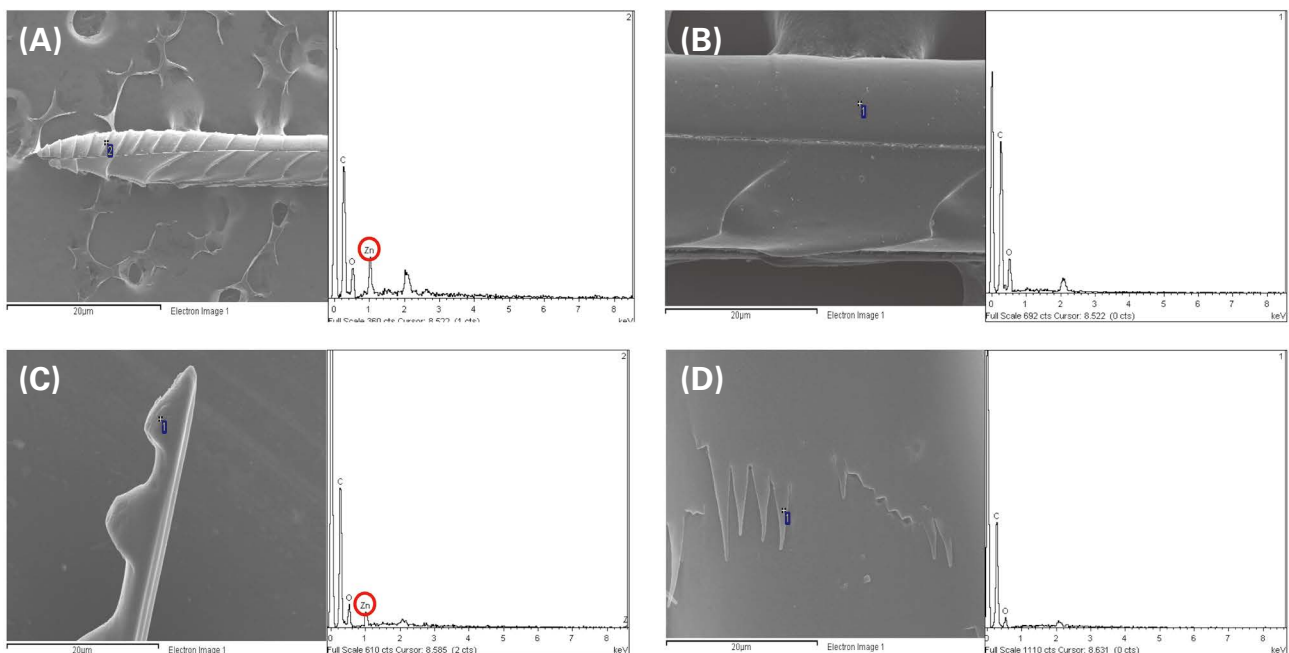


Fig. 6. Energy dispersive spectrometry (EDS) analysis of *Tremex fuscicornis* and *Leucospis japonica* by ovipositor part. (A) Zinc detected on the ovipositor tip of *T. fuscicornis*, (B) no zinc detected on the middle part of the ovipositor of *T. fuscicornis*, (C) zinc detected on the ovipositor tip of *L. japonica*, and (D) no zinc detected on the middle part of the ovipositor of *L. japonica*. Scale bars = 20 μm.

란관과 큰턱에 망간(Mn)과 아연(Zn)성분이 확인되었는데, 특히 아연(Zn)의 경우 주로 송곳벌과(Siricidae)와 밀들이좀벌과(Leucospidae)가 속하는 superfamily인 좀벌상과(Chalcidoidea)에 속하는 종들의 산란관에서 확인되었다(Quicke *et al.* 1998). 계통분류학 연구결과를 보면, 벌목에서 송곳벌과가 밀들이좀벌과에 비해 먼저 분지되면서 기초계통군(basal clade)을 형성하였고, 그 후 밀들이좀벌과가 벌아목(Apocrita)에서 분화되어 나왔다(Davis *et al.* 2010). 송곳벌과와 밀들이좀벌과는 진화적으로 분류학적 유연관계가 멀리 떨어져 있음에도 불구하고, 이 두 그룹의 산란관에서만 주로 아연 성분이 발견되었다. 이는 주로 목질을 천공하여, 알을 산란하는 두 종의 생태적 적응에 의해 발달된 특성으로 생각된다.

적 요

본 연구에서는 생태모방적 관점에서 목질을 천공하는 송곳벌과 밀드리좀벌의 산란관의 형태적 특징을 비교하였다. 벌목에 속하는 송곳벌과 밀드리좀벌은 목질부를 천공하는 유사한 특징이 있으나 실제현미경, 전계방사형주사전자현미경, 광학현미경을 이용하여 산란관의 형태적 특징을 관찰한 결과 두 종 간에 큰 차이를 보였다. 송곳벌의 산란관 말단은 등쪽과 배쪽에 모두 규칙적인 돌기가 발달하여, 회전형 드릴 비트와 흡사한 형태를 띠는 반면 밀드리좀벌의 산란관 말단은 한쪽 방향에만 몇 개의 돌기가 있고 다른 부분은 매끄러워 마치 톱과 비슷한 형태를 보였다. 또한 열록송곳벌 산란관의 말단은 대칭적으로 4등분으로 되어있다가 14번째 돌기를 지나면서 2:1:1의 비율로 3등분이 되는 반면, 밀드리좀벌 산란관의 말단은 2:1:1의 비율로 3등분되어 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 송곳벌의 산란관의 중간을 수평으로 자른 단면구조에서는 dovetail joint의 구조가 확인되었으며, 이를 통해 천공을 위해 수직 운동을 한다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 두 종의 형태적 차이는 목질 부분을 먹이원으로 이용하는 송곳벌과 벌의 유충을 이용하는 밀드리좀벌의 생활방식뿐만 아니라 계통분류학적 차이에 의해 기인한 것으로 사료된다. 끝으로, 산란관 말단 부분의 성분분석결과 두 종 모두에서 높은 강도의 특성을 부여하는 아연이 검출되었다. 이는 주로 목질을 천공하는 두 종의 생태적 적응 과정에 의하여 특이적으로 진화된 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국립생태원 기초생태연구(생태모방연구, NIE-기반연구-2020-18)와 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태모방 기반 환경오염관리 기술개발사업의 지원(20190028000072)을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- Bae H, EJ Park and E Lee. 2019. Current concept of biomimicry - Ecological approach for sustainable development. Korean J. Environ. Ecol. 33:116-123.
- Broomell CC, MA Mattoni, FW Zok and JH Waite. 2006. Critical role of zinc in hardening of Nereis jaws. J. Exp. Biol. 209:3219-3225.
- Cooperband MF, RA Wharton, WF Gordon and BS Vinson. 1999. New host and distribution records for *Leucospis* (Hymenoptera: Leucospidae) associated primarily with nests of *Centris* (Hymenoptera: Anthophoridae) in the dry forests of Costa Rica. J. Hymenopt. Res. 8:154-164.
- Davis RB, SL Baldauf and PJ Mayhew. 2010. The origins of species richness in the Hymenoptera: insights from a family-level supertree. BMC Evol. Biol. 10:109.
- Forest Research Institute. 1969. A List of Forest Insect Pests in Korea. Forest Research Institute. Seoul. p. 313.
- Frasson L. 2010. A novel flexible and steerable probe for minimally invasive soft tissue intervention. PhD thesis, Imperial College London, London.
- Gazola AL and CA Garofalo. 2003. Parasitic behavior of *Leucospis cayennensis* westwood (Hymenoptera: Leucospidae) and rates of parasitism in populations of *Centris* (*Heterocentris analis*) (Fabricius) (Hymenoptera: Apidae: Centridini). J. Kans. Entomol. Soc. 76:131-142.
- Hesami S, MA Akrami and H Baur. 2005. *Leucopsis dorsigera* Fabricius (Hymenoptera, Leucospidae) as a hyperparasitoid of Cerambycidae (Coleoptera) through Xoridae (Hymenoptera: Ichneumonidae) in Iran. J. Hymenopt. Res. 14:66-68.
- Kang H, JW Lee, JW Cho, MS Jeong, SK Lee and JS Jang. 2015. Evaluation method of a drill bit button arrangement for increasing drilling efficiency. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. 39:593-596
- Kim CJ, JO Lim and IK Kim. 2017a. An additional species of *Leucospis* (Hymenoptera: Chalcidoidea: Leucospidae), new to South Korea. Korean J. Appl. Entomol. 56:339-343.
- Kim JY, YK Kim, YR Lee and E Lee. 2017b. Sexual size dimorphism of the mouthpart and antenna of *Cyllorhynchites ursu-*

- lus* in Korea. Korean J. Environ. Biol. 35:515–520.
- Kim JY, YK Jim and E Lee. 2019. Anatomical observation of the mouthpart of *Cyllorhynchites ursulus* and comparison with other species. Korean J. Environ. Biol. 37:343–350.
- Lee JW. 1998. A Taxonomic Study on the Superfamily Siricoidea (Hymenoptera: Symphyta) from Korea. KOSEF 971-0510-053-1. National Research Foundation of Korea. Seoul.
- National Institute of Biological Resources. 2019. National Species List of Korea. Insects (Hexapoda). National Institute of Biological Resources. Incheon, Korea. p. 988.
- Park DY, JC Jeong and JW Lee. 2018. First record of *Leucospis yasumatsui* Habu (Hymenoptera: Leucospidae) from South Korea. J. Natl. Park Res. 9:234–236.
- Park YH, Sj Roh, JW Kim, BW Lee and CJ Kim. 2020. The mitochondrial genome of a horntail wasp, *Tremex fuscicornis* (Hymenoptera: Siricidae). Mitochondrial DNA Part B 5:3025–3026.
- Quicke DLJ, PWyeth, JD Fawke, HH Basibuyuk and JFV Vincent. 1998. Manganese and zinc in the ovipositors and mandibles of hymenopterous insects. Zool. J. Linn. Soc. 124:387–396.
- Schiff NM, H Goulet, DR Smith, C Boudreault, AD Wilson and BE Scheffer. 2012. Siricidae (Hymenoptera: Symnphyta: Siricoidea) of the Western Hemisphere. Can. J. Arthropod Identif. 21:1–305.
- Song Ch, KB Kwon, DY Shin, WK Hwang, JH Lim and JW Cho. 2013. Trend analysis of drilling technology for top-hammer drilling. Tunn. Undergr. Space Technol. 13:271–279.
- Torretta JP, CAR Molina and DA Aquino. 2017. Life cycles and host-parasitoid relationships of five species of *Leucospis* wasps in Argentina (Hymenoptera: Leucospidae). J. Nat. Hist. 51:1727–1742.
- Vincent JFV and MJ King. 1995. The mechanism of drilling by wood wasp ovipositors. Biomimetics 3:187–201.