한국음향학회지 제37권 제5호 pp. 276~283 (2018)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.37, No.5 (2018)
https://doi.org/10.7776/ASK.2018.37.5.276

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

헬름홀쯔 공명기 구조 매미 소리의 주파수 결정 발음기관 규명

Identification of frequency determining sound generating organ of cicadas with the Helmholtz resonator structure

윤기상,[1†] 조세현,[1] 정윤상,[1] 이동현[1]

(Ki-sang Yoon,[1†] Se-hyun Cho,[1] Yoon-sang Jung,[1] and Dong-hyun Lee[1])

[1]세종과학예술영재학교

(Received June 8, 2018; revised July 3, 2018; accepted September 17, 2018)

초 록: 이 연구는 헬름홀쯔 공명기 구조를 갖는 매미 소리의 중심주파수에 주요 영향을 주는 발음기관이 무엇인지를 최초로 초고속영상분석을 통해 규명하는 데 목적이 있다. 말매미와 참매미를 대상으로 소리를 녹음 후 분석하였고, 초고속카메라로 촬영한 진동막의 움직임을 분석하여 소리의 주파수와 진동막 운동 사이의 관계를 비교하였다. 연구결과, 말매미와 참매미 모두 유인음과 비명음의 주파수분포에는 차이가 거의 없었으며, 말매미의 진동막은 3개, 참매미의 진동막은 1개 모드로 진동하였다. 두 매미 모두 양쪽 진동막의 진동수에는 차이가 나타나지 않았으며, 말매미의 진동막의 3개 진동 모드는 서로 다른 진동수 대역의 소리가 발생하였다. 두 매미 모두 진동막의 진동수 대역과 유인음의 중심주파수 대역이 매우 유사하였다. 결론적으로, 헬름홀쯔 공명기 구조를 갖는 매미 소리의 주파수는 복부의 공명조건보다는 진동막의 모드별 진동수에 의해 결정되는 것으로 추정된다.
핵심용어: 헬름홀쯔, 매미, 진동수, 발음기관, 초고속영상

ABSTRACT: The purpose of the study is to identify a sound generating organ that has a major influence on the central frequency of the cicadas with the Helmholtz resonator structure for the first time. The sound of cicadas *Cryptotympana atrata* and *Hyalessa fuscata* were recorded and analyzed, then the motion of the tymbals was analyzed with a high-speed camera to compare the relationship between the frequency of sound and the motion of the tymbals. As a result, there was little difference in the frequency distribution of calling song and scream for two species. The tymbals of *C. atrata* oscillated in three vibration modes, while those of *H. fuscata* oscillated in one mode. There was no difference in the frequency of both tymbals of both cicadas, and three vibration modes of *C. atrata* generated sound with different frequency bands. The frequency band of tymbals and the central frequency band of calling song were very similar. In conclusion, it is presumed that the frequency of the cicadas with the Helmholtz resonator structure was determined by mode frequency of the tymbals than resonance condition of the abdomen.
Keywords: Helmholtz, Cicada, Frequency, Sound generating organ, High-speed image

PACS numbers: 43.80.Jz, 43.80.Ka

I. 서 론

매미는 전 세계적으로 2,000여 종이, 북한에만 서식하는 두눈박이좀매미를 제외하면 한국에는 12종이 서식한다.[1] 매미에는 진동음·타격음·마찰음을 발생하는 3가지 종류가 있지만, 한국산 매미는 모두 진동음 종류이다.[2,3] 수컷만이 소리를 발생할 수 있는 것으로 알려져 있었으나,[3] 암컷도 마찰음을 내는 사례가 발견되기도 하였다.[4] 진동음을 내는 매미는 진동

†**Corresponding author:** Ki-sang Yoon (cicadasound@naver.com)
Sejong Academy of Science and Arts, 265, Dalbit 1-ro, Sejong-si 30099, Republic of Korea
(Tel: 82-44-903-1173, Fax: 82-44-903-1161)

막이 진동하여 소리를 발생시키고, 비어있는 배 속에서 증폭하는 음향발생시스템을 가지고 있는데,[5] 공명통인 배의 형태에 따라 Helmholtz 공명기 구조인 일반매미(typical cicada)와 Bladder 공명기 구조인 풍선매미(bladder cicada)로 구분된다.[6] 헬름홀쯔 공명기는 단단한 벽의 공동에 비교적 작은 개구부를 갖고, 특정 주파수의 음을 감소시키거나 증폭시키는 역할을 한다.[7] 일반매미는 풍선매미보다 고막은 넓고 복부벽은 단단하다. 일반매미의 소리는 고막을 통해 방사되지만 풍선매미의 소리는 얇은 복부의 벽을 뚫고 방사된다.[8,9] 이에 한국산 매미 12종 중 털매미·늦털매미·참깽깽매미·말매미·유지매미·참매미·세모배매미·호좀매미·풀매미 총 9종은 일반매미로, 소요산매미·쓰름매미·애매미 총 3종은 풍선매미로 분류된다.

Yoon *et al.*[5]은 프로브마이크로폰으로 녹음한 진동막 소리를 통해 말매미의 진동막은 소리를 발생하기 위해 함몰할 때 3단계를 거치며 한 번에 복원되고 복부는 7 kHz ~ 7.5 kHz 대역을 크게 증폭시킬 수 있다고 하였으며, Yoon *et al.*[10]은 같은 방법으로 녹음한 소리를 통해 참매미는 1단계로 함몰하여 한 번에 복원되며 복부는 4 kHz ~ 5 kHz 대역을 크게 증폭시킬 수 있다고 하였다. 두 연구 모두 진동막이 함몰되는 모습을 고속카메라로 확인하려 하였으나 1,000 fps로 흑백 촬영하여 4 kHz가 넘는 소리를 내는 진동막의 함몰과정을, 영상으로 분석할 만큼 촬영하는 데에는 부족함이 있었다.[5,10] Yoon *et al.*[10]은 죽은 참매미 진동막 강제진동실험을 통해 진동막에서 발생한 소리 중 4 kHz 부근 대역을 복부가 증폭한다고 하였는데, 이 실험만으로 유인음의 주파수가 진동막의 진동에 의해 결정되는지, 복부에서 결정되는지에 대한 결론을 내지는 못하였다. 이 문제는 아직 해결되지 않고 있다.

이에 일반매미를 대상으로 진동막의 함몰과정을, 높은 해상도와 속도로 촬영하여 진동막의 모드별 진동수를 계산하여 진동막의 진동수와 복부의 공명조건 중 어떤 요소가 유인음의 주파수 결정에 주요하게 작용하는지를 규명하고자 하였다.

II. 매미 진동막의 구조

진동음을 발생하는 매미의 발음기관은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 발음근(Tymbal muscle), 장근(Tensor muscle), 진동막(Tymbal), 복부(Air sac), 고막(Tympanum)으로 구성되어 있다.[11]

진동막은 배에 있으며 양 옆에 두 개가 대칭적으로 위치한다. 볼록하게 튀어나온 돔 형태이며 Fig. 2와 같이 여러 개의 주름(rib)들이 있어 표면은 울퉁불퉁하다. 진동막의 성분은 주로 고탄성 단백질인 레실린(resilin)으로 되어 있으며 진동판(Tymbal plate)과 주름진 Long ribs, Short ribs는 주변의 레실린 패드에 비해 두껍다. 진동막이 함몰될 때는 short rib를 따라 진동판에 가까운 순서로 여러 단계를 거쳐 함몰된다.[12]

Fig. 3은 말매미 진동막을 광학현미경으로 촬영한 사진에,[13] Long ribs · Short libs · Tymbal plate를 표시한 것이다. 말매미 진동막에는 Long rib과 Short lib가 각

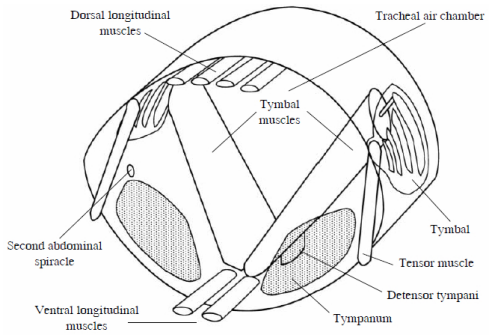

Fig. 1. The cicadas' sound generating organs.[11]

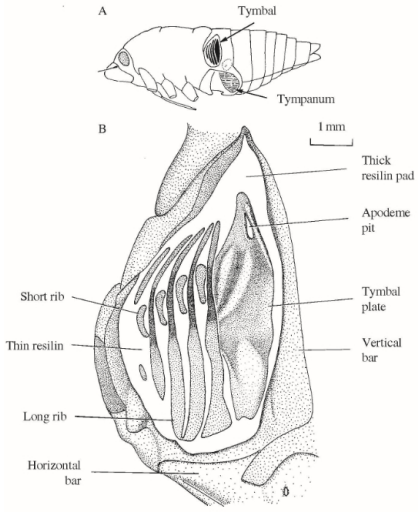

Fig. 2. (A) Outline of a male *Cyclochila australasiae* in lateral view. (B) The tymbal in lateral view. The long ribs are numbered (1–4) in the order in which they buckle during sound production.[12]

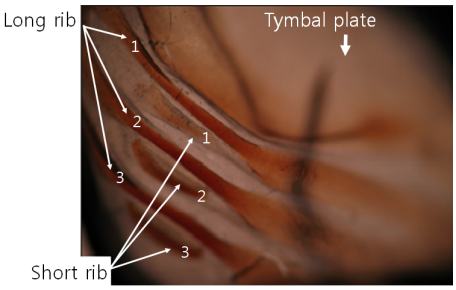

Fig. 3. Tymbal of the cicada *C. atrata*.[13]

각 3개씩 있어 진동판으로부터 가까운 순서로 1, 2, 3의 번호를 부여하였다.

III. 실험 방법

한국산 일반매미 9종 중 함몰과정의 단계가 음향분석 결과에서 다르게 제시된 말매미(*Cryptotympana atrata* Fabricius, 1775)와 참매미(*Hyalessa fuscata* Distant, 1905)를 연구대상으로 하였다.[5,10] 매미 소리 녹음은 세종특별자치시 조치원읍 번암리에서 실시하였다. 같은 종의 매미라도 개체에 따라 주파수 범위가 조금씩 다르기 때문에,[5,10] 매미 떼가 있는 나무 밑에서 녹음기(Sony PCM-D100)로 유인음을 20 s 이상 녹음(Sampling rate 44,100 Hz, 16 bits)하고 나서 그들 중 1마리를 채집하여 비명음을 녹음하였다. 녹음된 유인음과 비명음을 Adobe Audition CC 6.0으로 중심주파수를 분석하였다(Fast Fourier Transform size 1,024; window Blackmann Harris).

말매미는 세종특별자치시 조치원읍에서(2017.07.12.~2017.07.14.), 참매미는 강원도 영월군 영월읍에서(2017.08.04.~2017.08.05.) 각각 10마리 이상 채집하였다. 두 종류 모두 진동막덮개가 진동막을 보호하고 있어 핀셋으로 제거하였다. Fig. 4는 채집현장에서 촬영한 수컷 말매미와 참매미의 모습이다.

초고속카메라는 Phamtom사의 Miro LC310(20,000 fps, Resolution 384×288, Exposure 49.571 μs)을 사용하였으며, 매미별로 양쪽 진동막을 각각 10번 이상 촬영하였다. 촬영된 영상은 Phantom사의 PCC 2.7로 한 프레임씩 넘겨가며 10회 진동동안 촬영된 프레임수를 세고 역수를 취하여 진동수를 계산하였다. 같은 쪽 진동막을 모드별로 50회씩 분석하였다. 양쪽 진동막의

Fig. 4. Pictures of cicadas. (a) *C. atrata*, (b) *H. fuscata*.

진동수와, 같은 진동막에서 발생하는 모드별 진동수가 같다고 할 수 있는가를 불확도 계산을 통해 분석하였다. 진동막 초고속영상분석결과와 유인음의 주파수분석 결과를 그래프로 겹쳐 유사성을 비교하였다.

IV. 실험 결과

4.1 유인음과 비명음의 주파수 비교

Fig. 5는 말매미와 참매미의 유인음(Calling song)과 비명음(Scream)의 주파수 분포를 겹쳐서 비교한 것이다. 말매미 중심주파수의 평균±표준편차에 대해

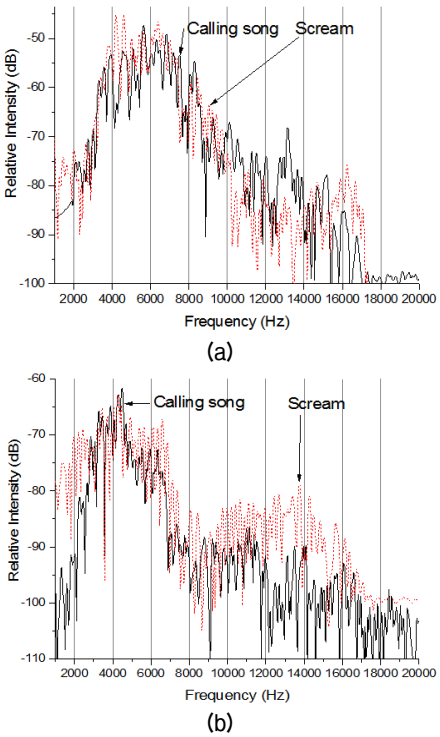

Fig. 5. Spectrum comparison graphs of calling song and scream. (a) *C. atrata*, (b) *H. fuscata*.

윤기상 등[5]은 6,030 Hz ± 700 Hz라고 하였고, 참매미에 대해서는 Yoon *et al.*[10]은 4,169 Hz ± 370 Hz, Puissant와 Lee[14]는 3,790 Hz ± 622 Hz라고 하였는데, 이 연구들이 제시한 대역에서는 유인음과 비명음의 주파수 분포가 유사하여, 비명음을 낼 때의 진동막을 촬영한 초고속영상을 분석하여 진동수를 계산하면 유인음을 낼 때의 진동막의 진동 상황으로 해석할 수 있다고 판단하였다. 그 외의 대역에서의 차이는 유인음과 비명음의 음색 차이에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

4.2 말매미의 진동막 초고속영상 분석 결과

말매미 진동막을 촬영한 영상을 분석하면서 세 가지 모드로 함몰하고 한 번에 복원되는 것을 확인하였다. 진동막 중 진동판을 포함하여 진동판에 가장 가까이 위치한 1번 long rib이 꺾여 1번 short rib까지 함께 함몰되면서 꼭지점이 형성되는 진동이 제1모드, 2번 long rib까지 꺾여 2번 short rib까지 함께 함몰되면서 꼭지점이 형성되는 진동이 제2모드, 3번 long rib까지 모두 꺾여 3번 short rib를 포함한 진동막의 모든 면이 진동하는 것이 제3모드이다. 제1모드에서 가장 좁게, 제3모드에서 가장 넓은 면적의 진동막이 진동하였다(Fig. 6 참조).

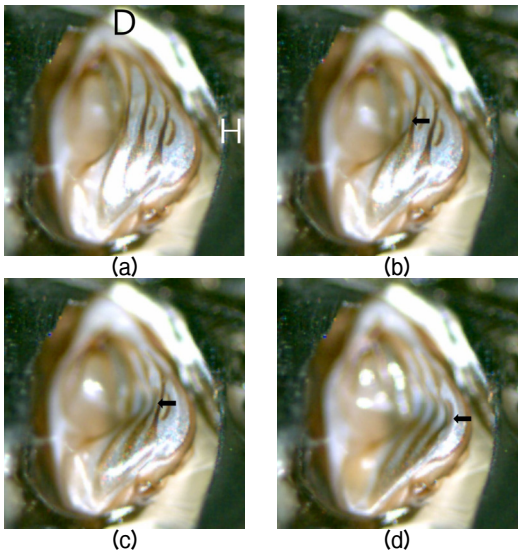

Fig. 6. Buckling process of the tymbal of the cicada *C. atrata*. D stands for Dosal and H for Head. The arrows indicate the vertices of the node lines in each mode. (a) Before buckling, (b) 1st mode, (c) 2nd mode, (d) 3rd mode.

Table 1은 양쪽 진동막의 모드별 진동수에 대한 통계결과를 정리한 것이다. 제1모드의 진동수 범위는 6,250 Hz ~ 7,692 Hz, 제2모드는 5,263 Hz ~ 7,692 Hz, 제3모드는 4,348 Hz ~ 5,015 Hz로 이를 모두 합치면 4,348 Hz ~ 7,692 Hz의 범위를 갖는다. 평균적으로 제1모드(7,001 Hz)보다 제2모드(6,294 Hz)에서, 또 제3모드(5,015 Hz)에서 더 낮은 진동수로 진동함을 알 수 있었다.

제1 · 2 · 3모드의 면적(mm^2)은 각각 8.94 : 13.08 : 16.93으로 1 : 1.46 : 1.89의 면적비를 보였다. 모드 순으로 1 : 1.21 : 1.37의 반지름비가 형성된다고 할 수 있으며, 가장자리가 고정된 원판의 진동수는 원의 반지름에 반비례하는 것으로 알려져 있어서,[15] 제1모드의 평균진동수인 7,001 Hz를 기준으로 계산하면 제2모드는 5,786 Hz, 제3모드는 5,110 Hz이어야 하는데, 제3모드는 이론값과 매우 유사하나 제2모드는 큰 차이를 보였다. 매미의 진동막은 평평하고 매끄러운 원판이 아닌 볼록한 돔 형태인데다가 ribs에 의한 주름이 있는 점들이 복합적으로 작용하여 이론값과 다른 진동수가 발생한 것으로 보인다.

Table 1의 세 가지 모드에서 모두 양쪽 진동막의 진동수는 차이가 없어 보이며, 모드별로는 같은 쪽의 진동막이라도 유의미한 차이가 있어 보인다. 이를 통계적으로 검증하기 위해 99 %의 신뢰수준에서 불확도를 계산하였다. 불확도를 평균에 적용하면 제1모드에서 좌측 진동막은 6,800 Hz ~ 7,120 Hz의 범위를 갖게 되는데, 우측의 평균값은 7,040 Hz로 이 범위

Table 1. Statistical values of frequencies of both tymbals in three modes of the cicada *C. atrata*. (unit: Hz)

mode \ statistics		range	mean ± SD
1st	L	6,250 ~ 7,692	6,960 ± 416
	R	6,250 ~ 7,692	7,042 ± 368
	T	6,250 ~ 7,692	7,001 ± 395
2nd	L	5,556 ~ 7,143	6,295 ± 432
	R	5,263 ~ 7,692	6,294 ± 482
	T	5,263 ~ 7,692	6,294 ± 458
3rd	L	4,348 ~ 5,882	5,026 ± 368
	R	4,348 ~ 5,882	5,004 ± 387
	T	4,348 ~ 5,882	5,015 ± 378

안에 들고, 우측은 6,900 Hz ~ 7,180 Hz의 범위이고 좌측은 6,960 Hz로 이 범위 안에 듦으로, 제1모드에서 좌우 진동막의 진동수는 다르다고 말할 수 없는 것으로 나타났다. 제2모드와 제3모드에서도 모두 같은 해석이 되므로 말매미의 좌우 진동막은 다른 진동수의 소리를 내지 않는다고 판단하였다. 이에 비해 좌측 진동막의 제1모드는 6,800 Hz ~ 7,120 Hz의 범위인데, 제2모드는 6,300 Hz이어서 제1모드 범위 안에 들지 못하고, 마찬가지로 제2모드는 6,090 Hz ~ 6,510 Hz의 범위인데, 제1모드는 6,960 Hz이어서 제2모드 범위에 들지 못하므로 좌측 진동막의 제1모드와 제2모드는 같은 진동수라고 말할 수 없다. 제3모드도 5,030 Hz이므로 제2모드 범위 안에 들지 않고 제2모드의 6,300 Hz도 제3모드의 4,890 Hz ~ 5,170 Hz 범위 안에 들지 않으므로 제2모드와 제3모드의 진동수도 같다고 말할 수 없는 것으로 나타났다. 우측 진동막에서의 3가지 모드도 같은 방법으로 분석해도 같은 결과가 나오므로 좌측이든 우측이든 모드별 진동수는 같다고 말할 수 없다(Table 2 참조).

말매미의 양쪽 진동막에서의 진동 모드별로 진동수를 구하여 500 Hz 대역으로 구분하였다. 진동막의 위치에 따라 진동수가 다르지 않으므로 양쪽 진동막의 진동수 자료를 합쳐 진동수 대역별 빈도수를 합하였다(Table 3 참조).

다음의 Fig. 7은 Table 3의 좌우 진동막 각각에 대해 3가지 모드별 데이터 수를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프 상에서 좌우 진동막의 진동수는 거의 같지만 진동모드별로는 다른 점을 발견할 수 있다. 그럼에도 불구하고 제1모드와 2모드의 완전히 분리되지 않고 겹치는 것을 볼 수 있으며 이 현상은 제2모드와 제3모드에서도 동일하게 나타났다.

Fig. 8은 자연 상태의 말매미 유인음을 주파수분석한 결과와 Table 3의 합계값을 하나의 그래프로 겹쳐서 표현한 것이다. 분석한 말매미 유인음은 '한국의 매미소리'[13]에 포함된 CD 속 말매미 소리를 이용하였다. FFT하여 그중에서 4,250 Hz, 4,750 Hz 등 Table 3에 제시된 주파수대역의 중앙치와 가장 유사한 주파

Table 2. Mean and uncertainty of frequency of both tymbals in three modes of the cicada *C. atrata*.

(unit: Hz)

mode	1st		2nd		3rd	
	L	R	L	R	L	R
mean ± uncertainty	6,960 ± 160	7,040 ± 140	6,300 ± 210	6,290 ± 180	5,030 ± 140	5,000 ± 150

Table 3. Frequency distribution of frequencies according to vibration modes of both tymbals of the cicada *C. atrata* (500 Hz band).

(unit: each)

Mode / Frequency (Hz)	1st		2nd		3rd		Total
	L	R	L	R	L	R	
4,000 ~ 4,500	0	0	0	0	1	2	3
4,500 ~ 5,000	0	0	0	0	20	20	40
5,000 ~ 5,500	0	0	0	2	21	19	42
5,500 ~ 6,000	0	0	14	12	8	9	43
6,000 ~ 6,500	7	4	22	22	0	0	55
6,500 ~ 7,000	13	10	8	8	0	0	39
7,000 ~ 7,500	24	30	6	5	0	0	65
7,500 ~ 8,000	6	6	0	1	0	0	13
Total	50	50	50	50	50	50	300

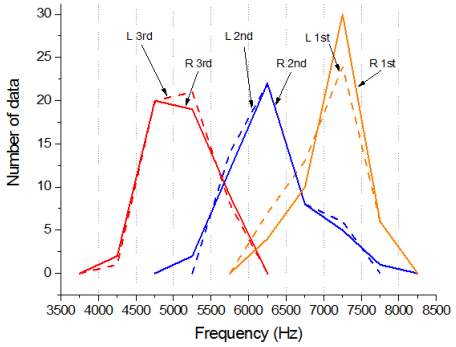

Fig. 7. Frequency distribution graph of frequencies according to vibration modes of both tymbals of the cicada *C. atrata* (500 Hz band).

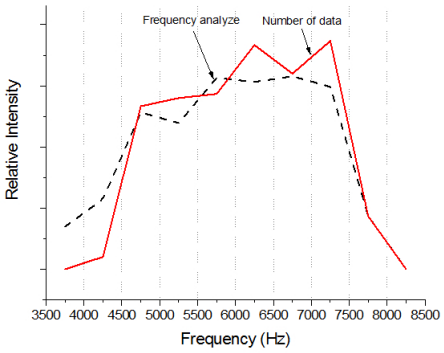

Fig. 8. Comparison of frequency analysis results of calling song and the number of data through high speed image Analysis of the cicada *C. atrata*.

수의 크기값만 선별하였다. 말매미의 유인음은 중심 주파수를 정확히 명시하기 어려울 만큼 피크가 평탄한데, 초고속영상분석결과도 유사하게 나타났다.

4.3 참매미의 진동막 초고속영상 분석 결과

Fig. 9는 참매미 진동막이 진동하는 모습을 촬영한 것으로 (a)는 함몰되기 전, (b)는 함몰된 상태의 순간을 포착한 것이다. 단 한 번에 함몰되고 한 번에 복원되는 것을 영상으로 확인할 수 있었다. 말매미에 비해 rib의 구분이 명확치 않은데, 함몰 시에는 2번으로 보이는 short rib이 함께 함몰되며 꼭지점 역할을 하는 것으로 관찰되었다.

초고속영상의 좌우 진동막의 진동수를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 좌우 진동막 진동수의 범위, 평균, 표준편차 등의 통계치가 비슷해 보여 말매미와 마찬가지로 불확도를 구하여 검증하였다. 우측 진동막의 평균값인 4,150 Hz가 좌측 범위인 4,100 Hz~ 4,320 Hz 안에 포함되고, 좌측 평균값인 4,210 Hz가 우측 범위인 4,060 Hz ~ 4 ,240 Hz 안에 포함되어 양쪽 진동막에서의 진동수가 다르다고 말할 수 없는 것으로 나타났다(Table 5 참조).

참매미의 진동막에서 발생한 진동에서 구한 진동수들의 분포는 말매미에 비해 매우 좁아서 200 Hz 간격으로 빈도수를 정리하였다(Table 6 참조).

Fig. 10은 Table 6의 양쪽 진동막 진동수를 그래프로 나타낸 것이다. 좌측 진동막이 넓은 진동수에서 골고루 넓게 분포하고 우측 진동막은 비교적 좁은 진동수 범위에서 집중적으로 분포하는 것으로 보인다.

Fig. 11은 Table 6의 합계값과 참매미 유인음 주파수분석 결과를 하나의 그래프에 겹쳐서 그린 것이다. 여기에서도 말매미와 마찬가지로 CD[13]에 수록된 참매미 유인음을 사용하였다. 4,200 Hz ~ 4,400 Hz 부근에서 피크가 비슷하게 형성되는 것을 볼 수 있었다. 초고속 영상 분석을 통해 참매미 유인음의 진동수를 분석하여 진동수 분포를 알아본 결과가 주파

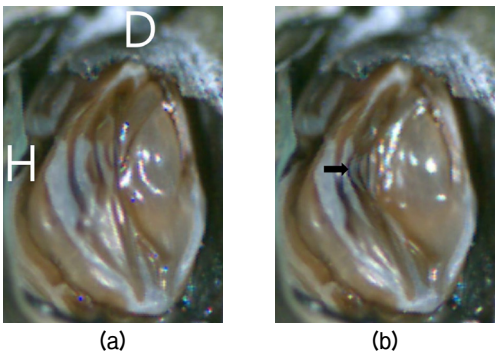

Fig. 9. Buckling process of the tymbal of the cicada *H. fuscata*. (a) before buckling, (b) after buckling.

Table 4. Statistical values of frequencies of both tymbals of the cicada *H. fuscata*.

Tymbal \ Statistics	Range	Mean ± SD
L	3,703 ~ 4,761	4,214 ± 288
R	3,571 ~ 4,347	4,150 ± 237
T	3,571 ~ 4,761	4,182 ± 266

Table 5. Mean and uncertainty of frequencies of both tymbals of the cicada *H. fuscata*.

Tymbal	L	R
Mean ± uncertainty	4,210 ± 110	4,150 ± 90

Table 6. Frequency distribution of frequencies of both tymbals of the cicada *H. fuscata* (200 Hz band). (unit: each)

Frequency (Hz) \ Tymbal	L	R	Total
3,500 ~ 3,700	0	3	3
3,700 ~ 3,900	9	5	14
3,900 ~ 4,100	7	4	11
4,100 ~ 4,300	11	17	28
4,300 ~ 4,500	13	21	34
4,500 ~ 4,700	6	0	6
4,700 ~ 4,900	4	0	4
Total	50	50	100

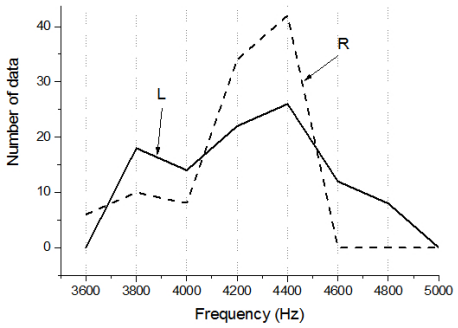

Fig. 10. Frequency distribution graph of frequencies of both tymbals of the cicada *H. fuscata* (200 Hz band).

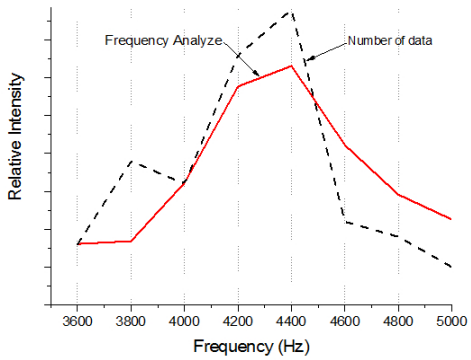

Fig. 11. Comparison of frequency analysis results of calling song and number of data through high speed image Analysis of the cicada *H. fuscata*.

수를 음향적으로 분석한 결과와 중심주파수 범위가 거의 일치함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 Yoon *et al.*[5]이 음향실험 결과로 제시한 3회에 걸친 말매미 진동막의 함몰과정과 Yoon *et al.*[10]이 마찬가지로 제시한 단 1회의 참매미 진동막의 함몰과정을 초고속영상으로 확인하였다. 음향실험만으로도 진동막의 함몰 모드수를 알 수 있으나 초고속영상을 통해 진동막의 구조 중 어떤 지점까지 함몰되는지, 어떤 면적비율로 모드가 달라지는지를 정확히 알 수 있었다. 말매미의 경우, 진동막의 진동판은 모든 진동모드에서 진동하며 모드별로 long rib이 진동판으로부터 가까운 것부터 순서대로 꺾이고 그 옆 같은 번호의 short rib이 함께 함몰하면서 모드별 진동면의 꼭지점 역할을 한다는 것을 동시에 알 수 있었다. 양쪽 진동막이 유사한 진동수의 소리를 내지만 같은 진동막의 모드별로 진동수에 통계적 차이가 있음을 발견한 것은 고무적이다. 참매미의 진동막이 하나의 모드로 진동하는 것을 쉽게 확인하였으나 진동막 전체 면적이 진동하지 않고, ribs의 중간 부분에서 마디선이 형성되는 점이 의외였다.

이 실험으로 알게 된 말매미 진동막의 진동수 범위가 4,348 Hz ~ 7,692 Hz인데 Yoon *et al.*[5]이 sine sweep tset로 제시한 복부의 증폭 주파수 대역이 7 kHz ~ 7.5 kHz인 것으로 보아 진동막이 발생한 소리 중 일부 주파수범위에 해당하는 소리를 증폭하는 역할을 하는 것으로 보이며, 마찬가지로 이 실험으로 알게 된 참매미 진동막 진동수 범위가 3,571 Hz ~ 4,761 Hz인데, Yoon *et al.*[10]이 제시한 복부의 증폭 주파수 대역이 4 kHz ~ 5 kHz인 것으로 보아 말매미와 비슷하게 진동막의 일부 주파수범위를 증폭하는 것으로 이해할 수 있다. 이 실험에 사용된 개체와 기존 연구에 사용된 개체는 다르므로 차이는 있을 수 있다. Figs. 8과 11의 유인음의 주파수분석결과는 복부를 거친 소리이고 자료의 수는 복부와 상관없는 데도 매우 유사하고, 복부 증폭 주파수 대역은 이에 비해 좁은 영역이므로, 결론적으로 일반매미 유인음의 중심주파수 대역은 진동막의 진동모드 수와 관련이 있어서, 진동모드 수가 적으면 좁은 중심주파수 대역을, 많으면 넓은 대역의 소리를 내고, 중심주파수는 진동막의 모드별 진동수에 의해 큰 영향을 받는 것으로 추정되며 복부는 진동막이 내는 대역의 소리를 효과적으로 증폭하는 것으로 판단된다. 이 연구는 기존의 음향분석으로는 알 수 없었던 복부의 증폭기능을 제외한 살아있는 매미의 진동막의 진동수를 영상으로 확인한 최초의 시도이며, 일부이기 하지만 일반매미 유인음의 중심주파수가 진동막에서 이미 결정되었다는 것을 주장하는 첫 사례라는 점에서 의의가 있다.

단, 일반매미 중 2종만을 대상으로 하였으므로 다른 일반매미에서도 동일하게 해석되는지를 추가로 연구할 필요가 있으며, Bladder 공명기 구조의 풍선매미에 대해서도 연구가 필요하다고 생각된다. 풍선매미인 애매미·쓰름매미·소요산매미의 경우, 유인음을 낼 때 배의 모양을 바꾸며 주파수를 변조하는 것으로 보아,[13] 진동막보다 복부의 움직임이 중심주파수에 큰 영향을 미칠 가능성이 높다고 예상된다.

감사의 글

이 논문은 과학기술진흥기금(과학기술정보통신부) 및 복권기금(기획재정부)의 재원으로 한국과학창의재단의 지원을 받아 제작됨.

References

1. Y. J. Lee, “Revised synonymic list of cicadidae

(Insecta: Hemiptera) from the Korean peninsula, with the description of a new species and some taxonomic remarks," Proc. the Biological Society of Washington. **121,** 445-467 (2008).
2. C. Luo, C. Wei, and C. Nansen, "How do "mute" cicadas produce their calling songs?" PLoS ONE. **10**, e0118554 (2015).
3. Y. J. Lee, "On the acoustic signals of cicadas (hemiptera, cicadidae)" (in Korean), Lucanus. **4**, 5-8 (2003).
4. C. Luo and C. Wei, "Stridulatory sound-production and its function in females of the cicada *Subpsaltria yangi*," PLoS ONE. **10**, e0118667 (2015).
5. K. S. Yoon, S. J. Seo, and J. G. Seo, "Asymmetry actions of tymbals & resonance condition in air sac of the cicada *Cryptotympana atrata*" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **26**, 1-7 (2007).
6. H. C. Bennet-Clark, "Resonators in insect sound production: How insects produce loud pure-tone songs," J. Experimental Biology. **202**, 3347-3357 (1999).
7. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics 4th* (John Wiley & Sons, New York, 2000), Chap. 10.
8. H. C. Bennet-Clark and D. Young, "Sound radiation by the bladder cicada *Cystosoma saundersii*," J. Experimental Biology. **201**, 701-715 (1998).
9. D. Young, "Do cicadas radiate sound through their ear-drums?," J. experimental Biology. **151**, 41-56 (1990).
10. K. S. Yoon, S. J. Seo, J. G. Seo, K. J. Park, "Resonance condition of the cicada *Oncotympana fuscata's* abdomen," J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.2(s) **30**, 223-228 (2011).
11. R. M. Hennig, T. Weber, F. Huber, H.-U. Kleidienst, T. E. Moore, and A. V. Popov, "Auditory threshold change in singing cicadas," J. experimental Biology. **187**, 45-55 (1994).
12. D. Young and H. C. Bennet-Clark, "The role of the tymbal in cicada sound production," J. experimental Biology, **198**, 1001-1019 (1995).
13. K. K. Kim, S. J. Kim, T. W. Kim, H. L. Seo, K. S. Seong, and K. S. Yoon, *Sounds of the cicadas in Korea* (in Korean) (Ilgongyuksa, Goyang, 2013), pp. 14.
14. S. Puissant and Y. J. Lee, "Description of a new species of the genus *Hyalessa China* (Hemiptera: Cicadidae: Sonatini) from Yunnan, China, with a key to the species of Hyalessa and a calling song analysis for two Hyalessa species," Zootaxa. **4114**, 434-446 (2016).
15. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics 4th* (John Wiley & Sons, New York, 2000), Chap. 4.

저자 약력

▸ 윤 기 상 (Ki-sang Yoon)

1999년 2월: 공주대학교 물리교육과 이학사
2002년 2월: 공주대학교 환경교육전공 교육학석사
2008년 2월: 공주대학교 환경과학과 이학박사
2010년 2월: 한국교원대학교 물리교육과 교육학석사
1999년 3월 ~ 2015년 2월: 대전광역시 중등교사
2015년 3월 ~ 현재: 세종과학예술영재학교 교사
2016년 9월 ~ 현재: 공주대학교 환경교육과 겸임교수

▸ 조 세 현 (Se-hyun Cho)

2016년 3월 ~ 현재: 세종과학예술영재학교 학생

▸ 정 윤 상 (Yoon-sang Jung)

2016년 3월 ~ 현재: 세종과학예술영재학교 학생

▸ 이 동 현 (Dong-hyun Lee)

2016년 3월 ~ 현재: 세종과학예술영재학교 학생