

말매미의 진동막 비대칭 운동과 복부에서의 공명 조건

Asymmetry Actions of Tymbals & Resonance Condition in Air Sac of the Cicada *Cryptotympana Atrata*

윤기상*, 서상준**, 서재갑**

(Ki-Sang Yoon*, Sang Joon Suh**, Jae-Gap Suh**)

*대전지족고등학교, **한국표준과학연구원 역학그룹

(접수일자: 2006년 10월 26일 채택일자: 2006년 12월 3일)

본 논문에서는 여름철마다 소음으로 사회적인 문제가 되고 있는 말매미 노랫소리의 음향특성과 발음 메커니즘을 연구하였다. 자연 상태에서의 노랫소리를 대상으로 파형과 FFT를 분석하였으며, 고속사진촬영으로 진동막 운동 형태를 분석하였다. 수컷 말매미의 복부 공동 (Cavity)의 공진주파수를 알기 위해 강제 공진 실험을 실시하였다. 실험 결과, 말매미의 두 진동막은 시간적으로나 형태적으로 비대칭 운동을 하며 매 진동시마다 다양한 주파수가 발생하는 것으로 관찰되었다. 또한 말매미는 약 7~7.5 kHz 영역의 소리를 공명시킬 수 있는 구조를 갖는 것으로 확인되었다.

핵심용어: 말매미, 진동막, 비대칭 운동, 공명 조건

투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8.9)

This paper presents a study on acoustic characteristics and sound generation mechanism of *Cryptotympana atratas*' songs which cause noise problems in summer days. The waveforms & FFT of *Cryptotympana atratas*' songs in nature were analyzed, and the actions of tymbals were visualized by the high speed camera. In order to know resonance frequency of the abdominal cavity of male *Cryptotympana atrata*, the sine sweep test was done. It was observed from the experimental results that *Cryptotympana atrata*'s two tymbals act asymmetrically with respect to time & shape, and make a variety of frequencies every time it vibrates. It was also shown that *Cryptotympana atratas*' have a structure that cause resonances sounds only in a 7~7.5 kHz bandwidth.

Key words: *Cryptotympana atrata*, Tymbal, Asymmetry action, Resonance condition

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8.9)

I. 서론

매미과(科)는 작은 몸집으로도 큰 소리를 발생시키는 신기한 곤충이다. 근래에 들어 한 여름철이면 인가주변의 매미 소음문제가 매스컴을 통해 심심찮게 전해진다. 그 중 금속성음이면서 가장 큰 소리를 내는 것이 말매미이다. 수컷 말매미의 몸길이는 약 40 mm로 우리나라에 서식하는 15종의 매미과 중 가장 큰 몸집을 갖고 있다. 소리를 발생시키는 것은 수컷으로, 암컷은 발음기관이 없어 일명 병어리매미라고도 불린다. 수컷이 소리를 내는 이유는 자신의 위치를 암컷에게 알리어 짝짓기를 하

기 위함이다 [1]. 때론 새 등의 천적의 위협을 받을 때에도 소리를 발생시키는데 이것은 일종의 비명소리로 사람이 매미를 잡았을 때도 이런 비명소리를 낸다. 물론 암컷을 위한 노랫소리와 비명소리는 그 형태와 맵시가 다르다. 비록 암컷을 위한 세레나데라고는 하지만 말매미의 경우, 소리의 크기가 매우 클 뿐만 아니라 한 마리가 소리를 내기 시작하면 다른 수컷 말매미들도 경쟁하면서 따라 소리를 내는 성향을 갖고 있어 많은 사람들에게 스트레스로 작용한다는 이야기가 여름철마다 각종 매스컴을 통해 자주 보도된다.

매미과의 발음 메커니즘은 많은 외국의 학자들에 의해서 연구가 되어왔다. 아쉽게도 우리나라에서 서식하는 매미과의 발음 메커니즘에 관한 연구는 미미한 수준에 있다. 말매미에 의한 소음문제는 해가 거듭될수록 점점 더

책임저자: 윤기상 (yoon7606@hanmail.net)
305-350 대전광역시 유성구 자족동 노은서길 184번지
대전지족고등학교
(전화: 010-5599-1892; 팩스: 042-476-2706)

심해질 것이라고 예상되어, 말매미의 발음 메커니즘과 그 음향특성을 정확히 이해할 필요가 있다고 판단하였다.

본 연구에서는 우리나라 매미과 중 몸집과 소리가 가장 큰 말매미를 대상으로, 그 진동막의 운동과 복부에서의 공명현상을 중심으로 실험을 하고 말매미의 소리가 어떤 메커니즘을 통해 발생하는지를 논하였다.

II. 발음기관

매미과는 전 세계적으로 2,000 여종이 있으며 우리나라에는 15종만이 기록되어 있다. 남한에서는 그 중 13종만이 발견되어 있는 상태이다. 매미과가 소리를 발생시키는 방법에는 진동, 마찰, 타격 등 세 가지가 있는 것으로 알려져 있다. 마찰음은 주로 앞날개와 가운데 가슴 등에 있는 마찰기관을 사용하여 소리를 내는 방식이며, 타격음은 별도의 발음기관 없이 날개를 서로 부딪치거나 앞날개로 식물을 쳐서 소리를 내는 방식인데, 우리나라의 종들은 모두 진동음 방식이다 [1].

진동음을 발생하는 매미과의 발음기관은 그림 1에서 보는 것과 같이 발음근 (Tymbal muscle), 장근 (Tensor muscle), 진동막 (Tymbal), 복부 (Air sac), 고막 (Tympanum) 으로 구성되어 있다 [2].

그림 2와 3은 발음기관을 접사사진과 SEM을 통해 관찰한 것이다. 그림 2에서 보듯이 두 개의 발음근은 V자 모양을 하고 있으며 발음근은 진동막의 한쪽 끝에 연결되어 있다. 진동막은 주로 고탄성 단백질인 resilin으로 되어 있는데, 장축의 길이는 약 5 mm로 여러 개의 주름 (rib)들이 있고 면은 매우 울퉁불퉁하다. 고막은 1~2 μm 두께의 매우 얇고 투명한 cuticle층으로 되어 있다.

그동안 세계적으로 진동음을 발생하는 매미과의 발음 메커니즘은 많이 밝혀졌으나 그 과정을 구분지은 연구는 없었다. 지금까지 알려진 사실을 토대로 매미과의 발음 메커니즘을 단계별로 구분하면 표 1과 같다.

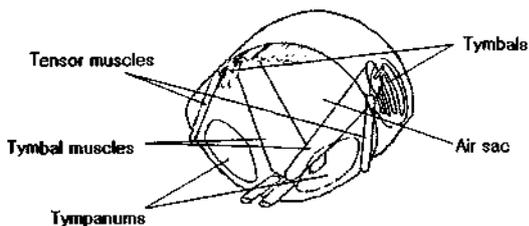


그림 1. 매미과의 발음기관
Fig. 1. Cicadas' sound generation organs.

표 1. 매미과의 발음 메커니즘

Table 1. Cicadas' sound generation mechanisms.

구분	단계	내용
음의 발생	1단계- 발음근의 수축이완	뇌에서의 전기신호가 발음근에 전해지면 발음근은 수축·이완 운동을 한다 (3).
	2단계- 진동막의 진동	발음근은 진동막에 연결되어 있어 발음근이 수축할 때 진동막이 안으로 휘어지면서 진동을 한다 (4). 두 진동막은 비대칭운동을 한다 (3). 장근은 수축하면서 발음근에 의한 소리의 진폭을 감소시킨다 (5).
음의 전파	3단계- 복부 공명	진동막에서 발생한 소리 중 일부는 복부의 공동에서 공명되어 큰 소리로 증폭된다 (6)(7).
	4단계- 방사	진동막에서 발생한 소리 중 일부는 직접 방사되며, 복부에서 증폭된 일부의 소리는 배를 치켜 올림으로써 배딱지를 열어 고막을 통해 방사되는 2 way system이다 (7).

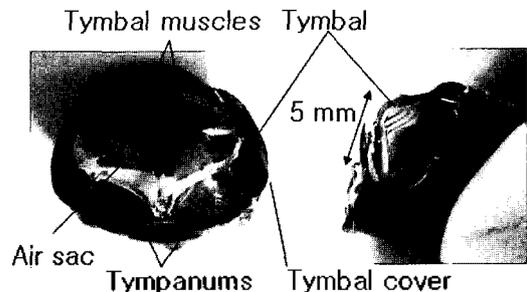


그림 2. 말매미의 발음기관
Fig. 2. *Cryptotympana atrata's* sound generation organs.

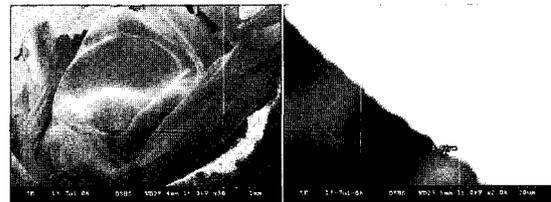


그림 3. 말매미 진동막(좌)과 고막(우)의 전자현미경 사진
Fig. 3. The SEMs of *Cryptotympana atrata's* tymbal (left) & tympanum (right).

본 연구에서는 2, 3단계에 관심을 가졌으며, 말매미의 진동막도 비대칭적으로 운동하며, 복부는 어떤 주파수 영역을 증폭시키는가에 초점을 두고 연구를 하였다.

III. 실험 방법

3.1. 노랫소리 분석

자연 상태에서의 말매미 노랫소리를 매우 조용한 공원 등에서 고지향성 마이크로폰 (Audio Technica 815B)과 DAT (SONY TCD-D8)를 이용하여 녹음 (샘플링 주파수 44.1 kHz)하였으며, PC로 A/D 변환하여 wave 파일을

생성, 어도비오디션 버전 1.5와 오리진 버전 6.0으로 분석하였다.

3.2. 진동막 소리 분석

말매미의 좌우 진동막이 비대칭적으로 운동하는가를 음향 분석방법으로 알기 위해, 그림 4와 같이 살아있는 말매미를 스펀지에 핀으로 고정시키고 양쪽 진동막 뒷면에 $\Phi=2\text{ mm}$ 의 구멍을 뚫고 두 개의 프로브 마이크로폰을 1 mm 깊이로 삽입한 후 말매미의 울음소리를 DAT에 스테레오로 녹음(샘플링 주파수 44.1 kHz)하여 3.1.과 같은 방법으로 분석하였다.

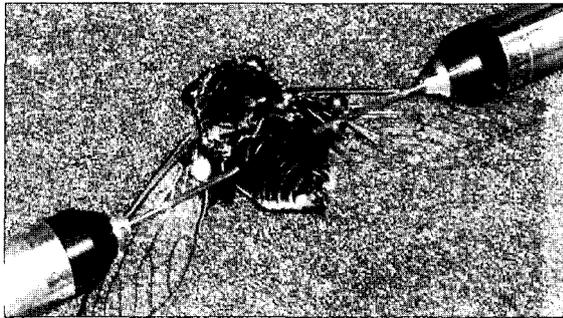


그림 4. 양쪽 진동막의 소리를 녹음하기 위한 실험 장치
Fig. 4. The experimental set-up for recording sound from both tymbals.

3.3. 진동막의 운동 촬영

두 진동막이 어떤 모양으로 비대칭 운동을 하는지를 보다 확실하게 확인하기 위해 고속카메라 (MODEL : REDLAKE MASD Inc. PCI 1000S, LENS : SIGMA F/# 2.8-4, ZOOM 24-135 mm, SPEED : 1000 frames/s, Shutter : 1/2000 s, F/# : 4, FOCUS : 100 mm)로 진동막의 운동 사진을 8초간 촬영하였다. 말매미의 진동막은 단단한 진동막 뒷개로 덮여 있어 이를 깨끗이 제거하고 말매미가 움직이지 못하도록 그림 5와 같이 테이블에 알루미늄 테이프로 고정시켰다.



그림 5. 양쪽 진동막의 운동을 촬영하기 위한 장치(좌)와 진동막 뒷개를 제거한 말매미 (우)
Fig. 5. The equipment set-up for photographing actions of both tymbals (left) and *Cryptotympana atrata* whose tymbal covers were removed (right).

3.4. 복부에서의 공명 조건

말매미의 복부 (Air sac) 내부는 약 50%가 공동 (Cavity), 약 50%가 내장을 비롯한 부드러운 생체조직으로 되어 있다. Helmholtz resonator로 알려진 Air sac은 어떤 주파수 영역을 공명으로 증폭시키는가를 알아보기 위해 말매미의 복부에 강제공진 실험을 실시하였다. 먼저 말매미 없이 공진 실험하여 스피커특성 (reference)을 구하였다. 그리고, 살아있는 말매미의 배막지를 3단계(gap : 1 mm (1st), 2 mm (2nd), 3 mm (3rd))로 벌려 실시하고, 양쪽 배막지를 떼어낸 후 프로브 마이크로폰을 고막 앞에 두고 (4th), 고막을 뚫어 프로브 마이크로폰을 Air sac 안에 삽입하여 공진 실험(5th)하였다 (그림 6 참조). Sweep 신호 대역은 20~10,000 Hz, resolution은 401로 하였다.

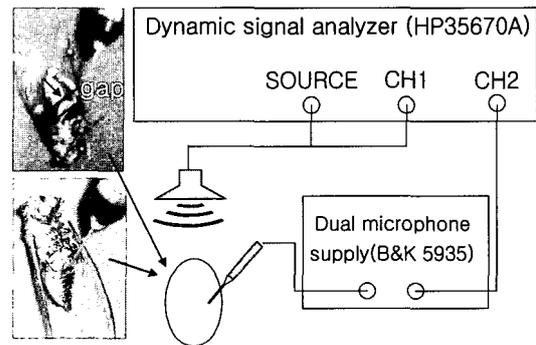


그림 6. Air sac의 공진 주파수를 알기 위한 실험 시스템
Fig. 6. The experimental system for testing the resonance frequency of the air sac.

IV. 실험 결과

4.1. 노랫소리 분석

자연 상태에서의 말매미 노랫소리를 파형과 주파수 관점에서 분석하였다. 그림 7은 전형적인 말매미 노랫소리의 파형 (그림 7a)을 보여 주고 있으며, 이에 대한 스펙트로그램 (그림 7b)을 도시하고 있다. 말매미의 노랫소리의 길이는 약 20초로, 음의 세기가 커지는 상승부, 큰 음을 유지하는 유지부, 음의 세기가 줄어드는 감쇠부, 이상 3단계로 구분할 수 있다. 상승부나 감쇠부보다 유지부에서 고음이 더 많이 발생한다. 말매미 소리를 확대하면 약 1 ms 동안에 음압이 감쇠 (decay)하는 현상을 발견할 수 있다. 스펙트로그램에서는 x축과 평행하게 검은색 선들이 보이는데 이는 피크와 피크 사이에 음압이 상대적으로 낮은 주파수 영역이 있음을 의미한다. 그림

8은 30마리의 말메미 노랫소리에 대한 파형을 FFT하여 도시한 주파수 특성을 보여 주고 있다. 각각의 중심주파수를 구한 결과가 표 2에 주어졌는데 주로 5~7 kHz 사이에서 분포하며, 피크는 한 마리에서 2개 이상이 발견되었다.

말메미 소리 고유의 주파수 특성을 살펴보기 위해, 하나의 노랫소리에서 감쇠가 확실한 신호 30개씩을 선택하여 FFT하고 합산한 스펙트럼을 관찰하였다. 그림 9는 5마리의 말메미 소리에 대한 감쇠신호의 주파수특성이다. 5마리 모두 그림 8과는 달리 주파수 피크가 한 개체마다 한 개임을 뚜렷하게 보여준다. 따라서 그림 8의 여러 피크의 존재는 말메미의 노랫소리에는 순수한 진동막 소리 외의 다른 변조된 소리가 공존함을 의미한다.

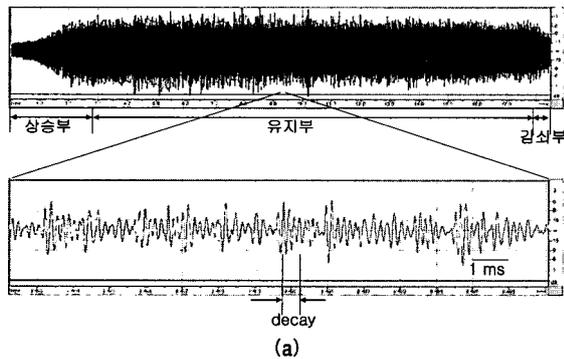


그림 7. 말메미 노랫소리의 시간 및 주파수 특성
(a) 파형 (b) 스펙트로그램
Fig. 7. Time and properties of *Cryptotympana atrata*'s song.
(a) Waveform (b) Spectrogram.

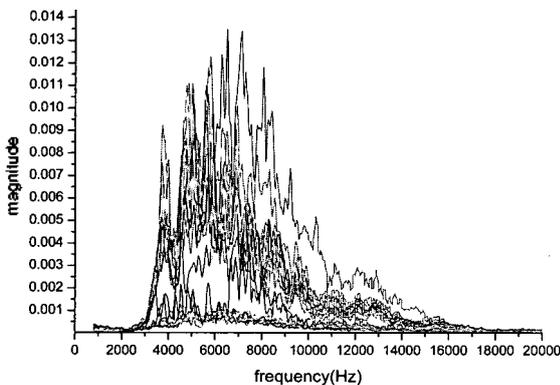


그림 8. 30마리의 주파수 분포
Fig. 8. FFT results of 30 data.

표 2. 말메미 30마리 노랫소리의 중심 주파수
Table 2. Dominant frequencies (f_0) of thirty *Cryptotympana atrata*'s songs.

Number	f_0 (kHz)	Number	f_0 (kHz)	Number	f_0 (kHz)
1	5.920	11	6.400	21	6.336
2	5.120	12	5.600	22	6.464
3	6.304	13	5.088	23	6.144
4	6.816	14	5.632	24	6.784
5	6.944	15	5.120	25	6.496
6	6.944	16	5.024	26	7.168
7	6.880	17	5.056	27	6.240
8	5.664	18	5.792	28	6.112
9	6.368	19	4.736	29	6.144
10	6.496	20	4.832	30	6.304
MEAN	6.030				
SD	0.700				

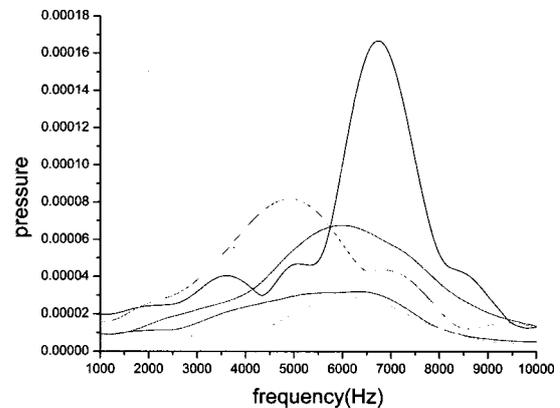


그림 9. 5마리 말메미에 대해, 노랫소리 내 30개의 순수한 감쇠 신호만을 FFT하여 합산한 주파수 스펙트럼
Fig. 9. FFT spectra accumulated over the 30 pure decay signals in a song for five *Cryptotympana atratas*.

4.2. 진동막 소리 분석

말메미 5마리의 좌우 진동막 소리를 녹음하고 파형을 분석하였다. 말메미1의 소리를 확대, 분석하면 그림 10과 같다. (a)~(d) 모두 말메미1에서 추출한 신호이며, (d)에서 IN은 진동막이 몸 안쪽으로 들어가는 것을, OUT은 진동막이 몸 바깥쪽으로 나오는 것을, transmitted는 반대편 프로브 마이크로폰에 감지된 신호를 뜻한다 [3]. 이 신호들은 모두 기본적으로 감쇠항을 포함한 sine 함수로, 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

(A : 진폭, α : 감쇠계수, ω : 각진동수, t : 시간)
시간이 지남에 따라 좌우 진동막이 함몰(buckling) 되는 회수가 다르고 회수가 같아도 맵시가 다르다. (d)에서 좌측 진동막 신호 3개, 우측 진동막 신호 4개를 각각 FFT한 결과 (e)를 얻었다. 전체적으로 Gaussian 분포를

갖지만 같은 진동막에서 나는 소리라 하더라도 주파수 분포가 다르게 나타남을 알 수 있다.

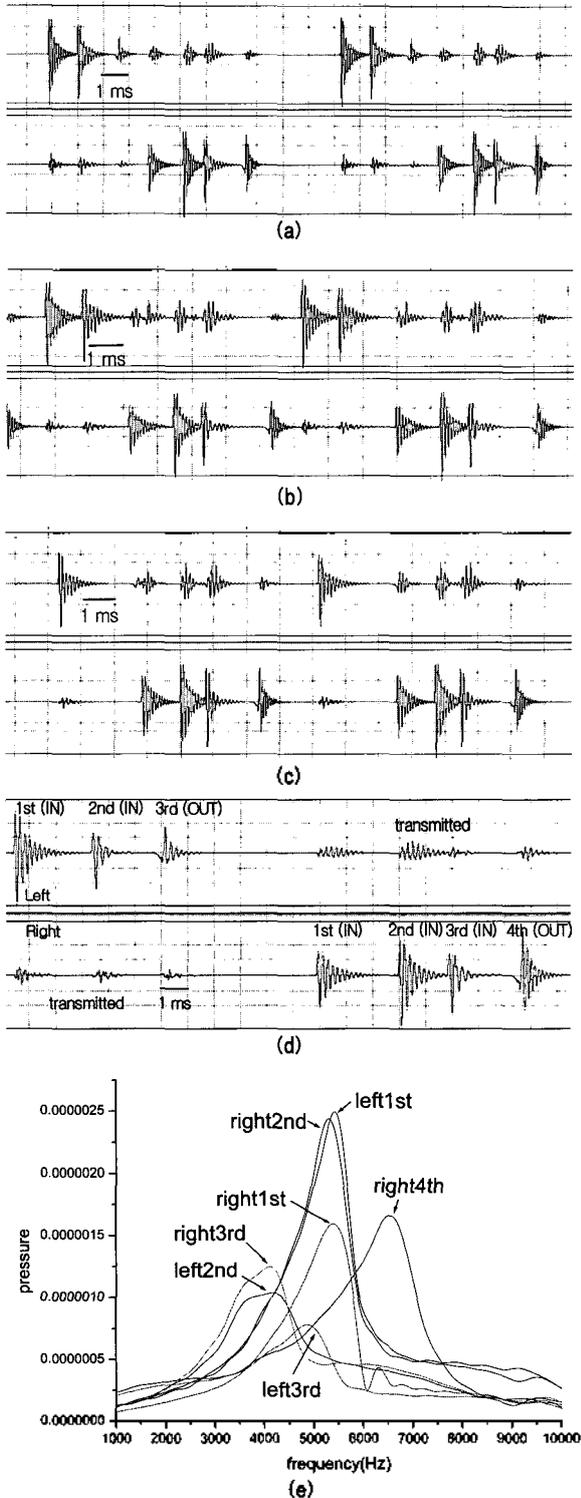


그림 10. 양쪽 진동막의 운동 패턴(말매미1)
 (a)~(d) 양쪽 진동막의 진동 패턴
 (e) (d)의 알뜰 신호를 각각 FFT한 결과
 Fig. 10. Action patterns of both tymbals(*Cryptotympana atrata* 1).
 (a)~(d) Vibration patterns of both tymbals.
 (e) FFT results from seven signals in (d).

다른 네 개체의 말매미 (2~5)에서도 같은 패턴의 소리가 발생하는지를 분석하였다. 그들 소리의 파형을 나타낸 것이 그림 11이다. 다섯 개체 모두 각기 다른 모습의 파형을 보였다. 사람마다 음색이 다르듯 말매미들도 개체마다 음색이 다르고 좌우 진동막이 내는 소리마저 서로 음색이 다를 수 있음을 알 수 있다.

특이하게도 말매미 5는 좌측 진동막 만으로 소리를 발생시키고 우측 진동막은 소리를 발생시키지 않았다. 그래서 말매미 5를 제외한 네 개체의 좌우 진동막에서 발생한 소리 중 깨끗이 감쇠되는 신호 10개를 무작위 추출하여 마루가 감쇠하는 정도 (decrement)를 분석하고 식 (2)에 적용하여 Q factor를 계산한 결과가 표 3에 주어졌다.

$$Q = \frac{\pi}{\ln(\text{decrement})} \quad (2)$$

계산 결과, 말매미 1~3은 좌우 진동막의 Q값에 작은 차이가 있지만 좌우 진동막의 진동 패턴이 다르고, 말매미 4는 비교적 더 큰 차이를 보였다. 좌우 진동막에서 발생하는 소리의 맵시가 다를 수 있음을 보여주고 있다.

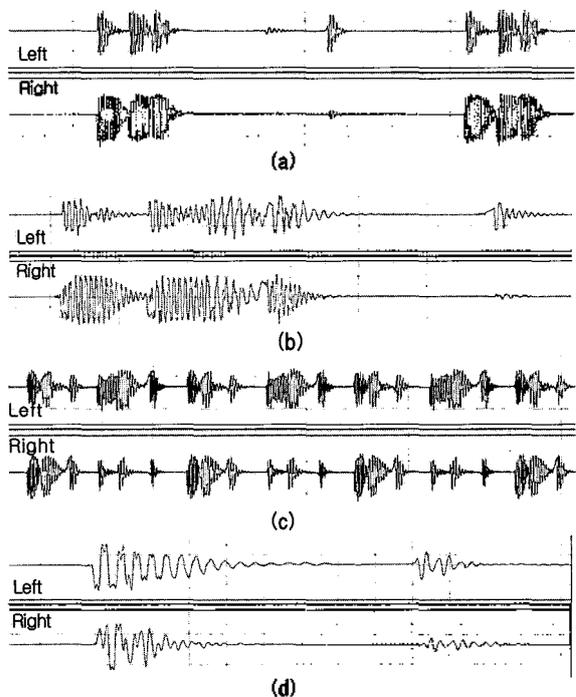


그림 11. 진동막 소리 파형(말매미 2~5)
 (a) 말매미 2 (b) 말매미 3 (c) 말매미 4 (d) 말매미 5
 Fig. 11. Waveforms of both tymbals' signals(*Cryptotympana atrata* 2~5).
 (a) *Cryptotympana atrata* 2 (b) *Cryptotympana atrata* 3.
 (c) *Cryptotympana atrata* 4 (d) *Cryptotympana atrata* 5.

표 3. 양쪽 진동막의 Q (말매미 1~4)

Table 3. Qs of both tymbals (*Cryptotympana atratas* 1~4).

말매미	회	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean	SD
1	L	9.44	10.69	9.75	10.61	9.01	7.92	10.57	10.50	12.10	9.40	10.07	1.15
	R	9.38	9.37	8.77	9.29	9.23	9.27	9.38	9.23	9.18	8.58	9.23	0.27
2	L	5.29	5.34	5.56	5.34	5.35	5.21	5.24	5.40	5.32	5.32	5.34	0.10
	R	6.73	6.90	6.49	6.42	6.27	6.82	5.80	6.32	5.15	5.87	6.28	0.54
3	L	12.10	11.96	11.35	11.46	11.81	11.81	12.16	11.97	12.26	12.05	11.89	0.29
	R	10.56	11.17	11.67	10.04	11.27	9.82	10.75	11.09	9.91	9.87	10.62	0.68
4	L	7.18	6.65	6.99	7.08	7.42	7.37	7.27	7.57	6.49	7.27	7.13	0.34
	R	4.13	4.19	4.32	4.39	4.54	4.19	4.29	4.16	4.13	4.36	4.27	0.13

4.3. 진동막의 운동 촬영

말매미의 양쪽 진동막 덮개를 떼어낸 후 고속카메라로 진동막이 움직이는 모습을 1 ms 간격으로 촬영하는 데 성공하였다. 그림 12의 (a)는 진동막이 움직이지 않을 때의 모습이고 (b)는 좌측 진동막 만이 움직일 때의 모습이다. 진동막의 주름 (Ribs)에 거의 수직으로 꺾여 크게 함몰되는 것을 볼 수 있다. (c)는 우측 진동막 만이 움직일 때의 모습으로 좌측 진동막에 비해 함몰의 정도가 작고 진동막 중에서도 복부와 가까운, 사진의 아래쪽만이 움직이는 것을 관찰하였다. 사진에서는 그림자의 넓이가 넓어진 것으로 확인할 수 있다. 두 진동막이 함몰되기 시작하면서 완전히 복원되는데 걸리는 시간은 5 ms 이 내이다.

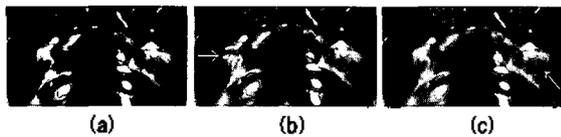


그림 12. 양쪽 진동막의 운동 사진
 (a) 양쪽 진동막 모두 운동하지 않을 때
 (b) 좌측 진동막이 운동할 때
 (c) 우측 진동막이 운동할 때

Fig. 12. The action pictures of both tymbals.
 (a) When no tymbal acts.
 (b) When the left tymbal acts.
 (c) When the right tymbal acts.

4.4. 복부에서의 공명 조건

복부의 Air sac에서 공명되는 주파수영역을 알아보기 위한 공진 실험을 통해 그림 13의 결과를 얻었다. 그림 13의 (a)는 스피커 특성 (reference)을 포함한 여섯 가지의 공진 실험 결과이며, (b)는 다섯 가지 (1st~5th)의 공진 실험결과에서 스피커 특성을 뺀 값들을 그래프로 나타낸 것이다. 다른 네 개체를 대상으로 한 동일한 실험에서도 거의 같은 결과를 얻었다. (b)에서 보듯이 스피커 특성보다 훨씬 큰 응답신호가 나타나는 부분이 공명이

잘 일어날 수 있는 조건이 된다. 따라서 말매미의 Air sac은 약 7~7.5 kHz 사이의 음을 증폭시킬 수 있는 공명 시스템을 알 수 있었다. 표 2에서 중심주파수의 평균이 6.03 kHz인 것과는 다소 차이가 있다.

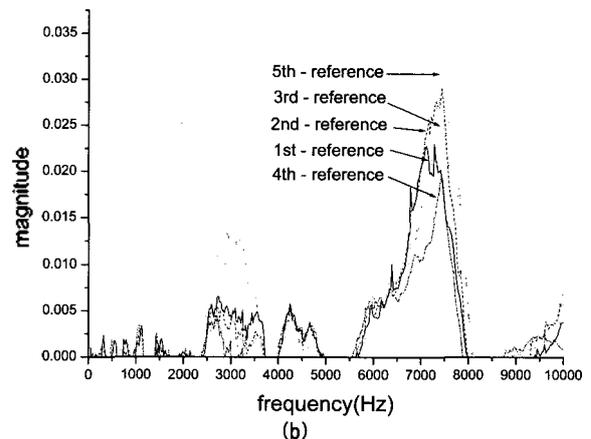
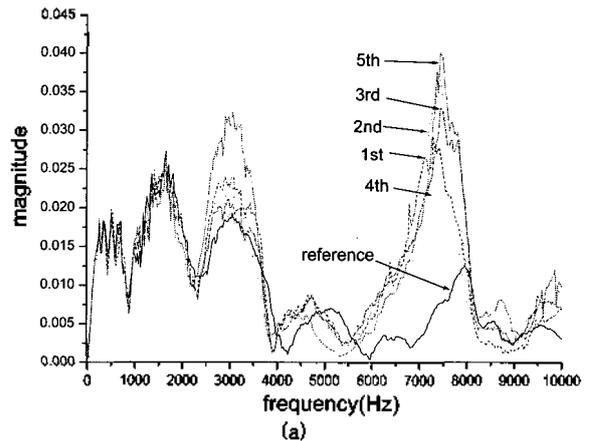


그림 13. 말매미 복부에서의 공진 실험 결과
 (a) 여섯 가지 sweep 실험 결과
 (b) 다섯 결과에서 스피커 특성을 제거한 결과
 Fig. 13. Results from resonance experiment in *Cryptotympana atrata's* air sac.
 (a) Sweep experiment results in six cases.
 (b) Results that are five results minus speaker character.

V. 결론

본 논문에서는 말매미 진동막의 운동특성과 복부에서의 공명조건에 초점을 두고 연구하였다.

노랫소리 속에서 pulse가 감쇠하는 것을 발견하였고, FFT 결과 하나의 노랫소리에서도 많은 피크가 동시에 존재함을 알게 되었다. 중첩되지 않은 깨끗한 진동막 소리를 프로브 마이크로폰과 DAT를 이용하여 녹음한 결과, 좌우의 진동막이 시간차를 두고 비대칭적으로 진동함을 알았다. 그리고 개체마다 그 파형이 달라 말매미 내에서도 다른 음색을 갖고 있음을 확인하였다. 좌우 진동막에서 발생한 소리가 같은 Q factor를 갖지 않음도 알게 되었다. 또한 고속카메라로 진동막의 움직임을 촬영하는데 성공함으로써 더욱 확실한 근거를 갖게 되었다. 공진 실험으로 말매미의 복부는 약 7~7.5 kHz의 소리를 크게 증폭시키는 시스템이라고 할 수 있음을 알았다.

또한 노랫소리 중 감쇠가 깨끗한 신호만을 별도로 FFT하면 한 개체당 하나의 피크만이 나타났다. 그렇다면 그림 8에서 4~9 kHz 사이의 여러 피크들은 왜 생기는 것인가? 종합하면 말매미의 노랫소리는 순수한 진동막의 소리 외에 다른 주파수 대역을 갖는 소리가 있다. 순수한 진동막 외의 소리가 어떤 것인지는 보다 깊이 연구해 볼 만한 과제로 남아 있다.

참고 문헌

1. 이영준, *매미박사 이영준의 우리 매미 탐구* (지오북, 서울, 2005), pp. 62-64.
2. R. M. Hennig, T. Weber, F. Huber, H.-U. Kleidienst, T. E. Moore, A. V. Popov, "Auditory threshold change in singing cicadas," *J. exp. Biol.* 187, 45-55, 1994.
3. P. J. Fonseca, H. C. Bennet-Clark, "Asymmetry of tymbal action structure in a cicada : A possible role in the production of complex songs," *J. exp. Biol.* 201, 717-730, 1998.
4. H. C. Bennet-Clark, "Tymbal mechanics and the control of song frequency in the cicada *Cyclochila australasiae*," *J. exp. Biol.* 200, 1681-1694, 1997.
5. R. M. Hennig, T. Weber, F. Huber, T. E. Moore, H.-U. Kleidienst, A. V. Popov, "Function of the tensor muscle in the cicada *Tibicen linnei*," *J. exp. Biol.* 187, 33-44, 1994.
6. H. C. Bennet-Clark, "Resonators in insect sound production : How insects produce loud pure-tone songs," *J. exp. Biol.* 202, 3347-3357, 1999.
7. Wan-Ho Cho, Jeong-Guon Ih, Hae-Won Jang, "An acoustic actuator based on the singing mechanism of cicadas,"

ICSV12 CD-ROM, Lisbon 11-14 July, 2005. ICSV12 CD-ROM, Lisbon 11-14 July, 2005.

저자 약력

• 윤기상 (Ki-Sang Yoon)



1999년 2월: 공주대학교 과학교육과 물리전공 (이학사)
2002년 2월: 공주대학교 교육학과 환경교육전공 (교육학석사)
2005년 2월: 공주대학교 환경과학과 (박사과정 수료)
1999년 3월~2003년 2월: 대덕중학교 교사
2003년 3월~2005년 2월: 대전교육과학연구원 교사
2005년 3월~현재: 대전자족고등학교 교사

• 서상준 (Sang Joon Suh)

한국음향학회지 제22권 6호 참조

• 서재갑 (Jae-Gap Suh)

한국음향학회지 제22권 6호 참조