

유지매미의 저조파 신호에 관한 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Sub-harmonics Signal in the Cicada *Graptopsaltria nigrofuscata*

윤기상[†] · 김예건^{*} · 이영건^{**}

Ki-sang Yoon[†], Ye-geon Kim^{*} and Young-keon Lee^{**}

(Received April 17, 2024 ; Revised August 13, 2024 ; Accepted August 13, 2024)

Key Words : Cicada(매미), *Graptopsaltria nigrofuscata*(유지매미), Sub-harmonics(저조파), Nonlinear(비선형), Resonance Condition(공명조건)

ABSTRACT

The aim of this study involves identifying the causes of sub-harmonics in the cicada *Graptopsaltria nigrofuscata*. Three peaks were generated in the calling song, the scream, and during the experiment, which aimed to examine the resonance condition of the abdomen. The tymbal produced a simple vibration with just one IN- and OUT-click, and this frequency was similar to the 2nd peak. In conclusion, the dominant frequency of the sound produced by the cicada *G. nigrofuscata* corresponds to the 2nd peak, ranging from 5 kHz ~ 6 kHz. This occurs during IN-click of the tymbal. The 1st peak is a sub-harmonic, representing half of the dominant frequency, while the 3rd peak is a super-harmonic, representing double the dominant frequency. The generation of the 1st peak was successfully interpreted as a result of nonlinear resonance.

1. 서론

북한에만 서식하는 두눈박이줄매미를 제외하면 한국에는 12종의 매미가 서식한다⁽¹⁾. 세계적으로 매미는 진동음·타격음·마찰음을 발생하는 3가지 종류가 있지만, 진동음 종류가 대부분이고 한국산 매미는 모두 진동음을 낸다^(2,3). 진동음을 내는 매미는 발음근이 수축과 이완을 반복하는 운동으로 진동막이 진동하여 소리를 발생시키고, 공명통의 역할을 하는 복부에서 증폭하여 방사되는 이중공진기 형태의 음향 발생 시스템을 가지고 있다^(4,5). 공명통인 배의 형태에 따라

helmholtz 공명기 구조인 typical cicada와 bladder 공명기 구조인 bladder cicada로 구분되는데⁽⁶⁾, Yoon et al.은 typical cicada를 일반매미로, bladder cicada를 풍선매미로 번역하였다⁽⁷⁾. Helmholtz 공명기는 단단한 벽의 공동에 비교적 작은 개구부를 갖고, 특정 주파수의 음을 감소시키거나 증폭시키는 역할을 한다⁽⁸⁾. 일반매미의 복부는 풍선매미에 비해 단단하고 고막은 개구부의 역할을 한다^(9,10). Yoon et al.은 한국산 매미 12종 중 털매미·늦털매미·참깡깡매미·말매미·유지매미·참매미·세모배매미·호좁매미·풀매미 총 9종을 일반매미로 분류하고⁽⁷⁾, 가장 흔하면서 소리 특성이 서로 다른 말매미와 참매미를 대상으로 진동막의 움직임

[†] Corresponding Author ; Member, Duru Middle School, Science Teacher

E-mail : cicadasound@naver.com

^{*} Department of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University, Student

^{**} Department of Mechanical Engineering Yonsei University, Student

[‡] Recommended by Editor Wan Ho Cho

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

임을 초고속 영상으로 분석하고 기존 말매미와⁴⁾ 참매미¹¹⁾ 소리에 관한 논문과 비교하여 말매미와 참매미의 경우, 진동막이 유인음의 중심주파수를 결정하고 복부는 이 중심주파수를 잘 공명시켜 주는 역할을 한다고 하였다. 그러면서 일반매미 중 말매미와 참매미만을 대상으로 하였으므로 다른 일반매미에서도 동일하게 해석이 가능한지에 대해서도 추가로 연구할 필요가 있다고 제안하였다.

유지매미의 최초 기록지는 일본이며, 일본인 이치카와가 1906년에 제주도의 곤충 목록에 유지매미를 포함시킨 것이 한국 최초의 기록이다¹²⁾. 7월에 출현하기 시작하여 8월에 가장 활발하며 9월까지 활동한다. 낮에는 조용하게 있다가 해가 질 무렵에 가장 활발하게 활동하며 집단 서식하는 곳에서는 낮에도 잘 운다¹²⁻¹⁶⁾. 짝짓기에 성공한 암컷은 여름에 나뭇가지에 알을 낳고 알은 약 566.6일 후인 6월 말부터 7월 중순에 부화하여¹⁷⁾, 땅속에 들어가 3년~4년 후에 성충이 된다는 보고가 있다¹²⁾. 유지매미 소리를 관찰하던 중 약 2500 Hz에서 작은 피크를 발견하였는데, 이 피크는 <한국의 매미 소리>와¹³⁾ <日本産セミ科図鑑>에서는¹⁴⁾ 언급되지 않은 것으로, 두 책의 주파수분석 결과 그래프에서는 보이지만 설명에서는 모두 무시되었다. 이 피크의 존재가 외부 잡음인지 유지매미에 의해 발생하는 하나의 신호인지를 이 연구에서 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 유인음 녹음

유지매미의 자연적인 소리의 특성을 분석하기 위해 한국과 일본의 다양한 장소에서 수년간 휴대용 디지털녹음기(Sony PCM-D100)를 들고 잡음이 적은 환경에서 직접 녹음하거나(sampling rate 44 100 Hz, 16 bit, low cut 150 Hz), songmeter(wildlife acoustics SM4)를 나무에 고정하여 나무 주변에서 발생하는 유인음을 녹음하였다(sampling rate 44 100 Hz, 16 bit, low cut 220 Hz). Fig. 1은 울음을 그치고 잠시 쉬고 있는 수컷 유지매미의 모습이다.

2.2 비명음 녹음

유인음과의 유사점 및 차이점을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 채집한 유지매미의 진동막 덮개를 제거하고 스펀지에 핀으로 고정시킨 후, 프로브마이크로폰

(B&K 4182) 2개를 좌우 진동막의 1 mm 거리 앞에 각각 설치하고 앰프(B&K 2804)를 통해 디지털녹음기(Sony PCM-D100)에 스테레오로 녹음하였다(sampling rate 44 100 Hz, 16 bit, low cut 150 Hz).

유인음과 비명음은 잡음이 없이 깨끗하게 녹음된 부분만 편집하여 활용하였다. Adobe Audition CC 2020으로 파형과 주파수를 분석(FFT size 1024; window blackmann harris)하였다.

2.3 진동막의 움직임 초고속촬영

비명음을 내는 동안의 진동막 움직임을 초고속카메라(Phantom Miro LC310, software PCC 2.7, 20 000 fps, resolution 384 × 288, exposure 49.571 μs)로 촬영하였다. 수백 개의 영상 중 명료하게 보이는 부분을 임의로 선택하여 한 프레임씩 건너 가며 10회 진동하는 동안 촬영된 프레임 수를 세고 역수를 취하여 진동수를 계산하였다.

2.4 복부의 공명 조건 실험

복부가 어떤 진동수 영역을 공명시킬 수 있는지 알기 위해 sine sweep test(1 kHz ~ 20 kHz, resolution



Fig. 1 Picture of the cicada *G. nigrofuscata*

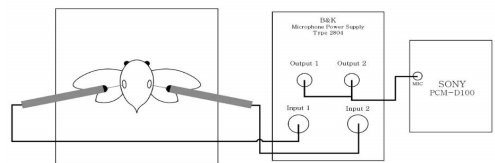


Fig. 2 The experimental set-up for recording scream from both tymbals

501)를 실시하였다. 죽은 직후 100 % 알코올 시약에 보관해 유연한 상태의 7마리 수컷 사체와 dynamic signal analyzer(HP 35670A), 앰프(B&K 2693-A), 스피커(Final E3000)를 사용하였다. 고막을 덮고 있는 배딱지를 제거하고 스피커는 오른쪽 고막에, 프로브 마이크로폰은 왼쪽 고막에 바짝 붙여 실험하였다. Fig. 3과 같이 스피커의 공진특성과 7마리 유지매미의 복부 공명 조건 값을 구하였다.

3. 실험 결과

3.1 유인음 분석

유인음을 Adobe Audition CC 2024로 재생한 결과는 Fig. 4와 같다. 파형, 스펙트로그램, FFT를 분석한 결과, 지속시간은 약 20 s~40 s이며, 모두 3개의 피크가 존재함을 확인하였다. 약 2000 Hz~3000 Hz에서 1st, 5000 Hz~6000 Hz에서 2nd, 10 000 Hz~12 000 Hz에서 3rd 피크가 발견되었다.

녹음된 유지매미 소리 중 잡음이 없는 30개의 유인음을 임의로 선택하여 3개의 피크에 해당하는 주파수를 각각 기록하였다. Table 1과 같이 1st 피크의 경우, 범위는 2239 Hz~2885 Hz, 평균±표준편차는 2626 Hz±160 Hz이었다. 2nd 피크의 경우, 범위는 5082 Hz~6417 Hz, 평균±표준편차는 5452 Hz±329 Hz이었다. 3rd 피크의 경우, 범위는 10 207 Hz~13 351 Hz, 평균±표준편차는 11 134 Hz±604 Hz이었다. 1st 피크를 기준으로 평균값만을 단순 비율로 계산하면 1st:2nd:3rd=1:2.07:4.24로, 2nd는 1st의 약 2배, 3rd는 약 4배의 일정한 비율을 갖는 것으로 나타났다. 또한 표준편차만을 단순 비율로 계산하면 1st:2nd:3rd=

Table 1 FFT results of three peaks of 30 calling songs [unit: Hz]

Number	1st	2nd	3rd
1	2239	5082	10 207
2	2326	5082	10 250
3	2369	5125	10 422
4	2455	5125	10 580
5	2455	5168	10 680
6	2498	5168	10 724
7	2498	5211	10 810
8	2541	5211	10 863
9	2541	5211	10 896
10	2541	5211	10 896
11	2584	5254	10 896
12	2627	5297	10 896
13	2627	5297	10 896
14	2627	5297	10 939
15	2627	5297	10 939
16	2627	5383	10 982
17	2670	5383	11 068
18	2670	5460	11 111
19	2670	5469	11 197
20	2670	5556	11 197
21	2670	5556	11 283
22	2713	5556	11 326
23	2756	5556	11 326
24	2756	5642	11 499
25	2756	5814	11 499
26	2799	5814	11 757
27	2842	5814	11 757
28	2842	6029	11 843
29	2885	6072	11 929
30	2885	6417	13 351
Mean	2626	5452	11 134
SD	160	329	604
Ratio of mean	1.00	2.07	4.24
Ratio of SD	1.00	2.06	3.78

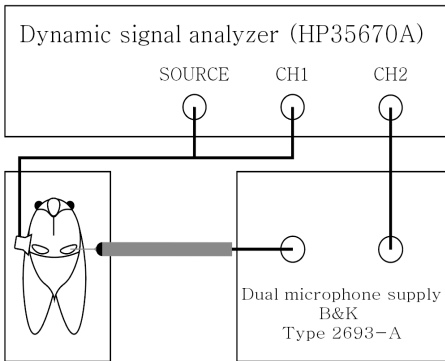


Fig. 3 The experimental set-up for the sine sweep test of the cicada *G. nigrofuscata*'s abdomen

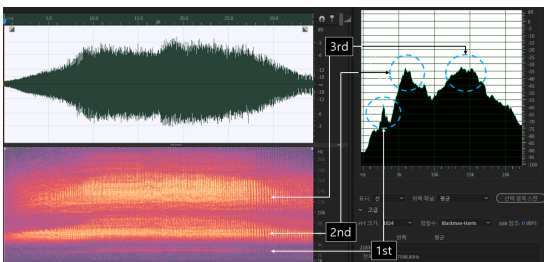


Fig. 4 Waveform, spectrogram and FFT result of the calling song of the cicada *G. nigrofuscata*

1:2.06:3.78의 비율로, 주파수가 높아질수록 일정한 비율로 표준편차가 커지는 것을 알 수 있다.

3.2 비명음 분석

비명음이 발생하는 동안의 스펙트로그램은 Fig. 5와 같다. 비명음을 낼 때 진동수가 매우 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다. 2nd와 3rd 피크에 비해 1st 피크는 주파수의 변화가 거의 없다.

비명음의 임의의 구간 30개를 골라 3개의 피크에 대해 FFT한 결과는 다음의 Table 2와 같다. 1st 피크의 경우, 범위는 2190 Hz ~ 2827 Hz, 평균 ± 표준편차는 2539 Hz ± 167 Hz이었다. 2nd 피크의 경우, 범위는 5383 Hz ~ 6934 Hz, 평균 ± 표준편차는 6124 Hz ± 459 Hz이었다. 3rd 피크의 경우, 범위는 11 240 Hz ~ 15 246 Hz, 평균 ± 표준편차는 13 694 Hz ± 1089 Hz이었다. 1st 피크를 기준으로 평균값만을 단순 비율로 계산하면 1st:2nd:3rd=1:2.41:5.39, 표준편차만을 단순 비율로 계산하면 1st:2nd:3rd=1:2.76:6.54의 비율로, 주파수가 높아질수록 일정한 비율로 표준편차가 커지는 것을 알 수 있는데, 이 비율이 유인음에서의 비율보다 더 크다.

진동막 소리의 스테레오 파형을 분석하였다. 양쪽 진동막은 다른 매미들과 마찬가지로 비동시적으로 함몰되는 것으로 나타났다^(4,11,18). 좌측 진동막이 함몰하고 복원된 이후 우측 진동막이 함몰하고 복원되었다. Fig. 6(a)에서 진동막의 in-click 신호의 지속시간은 약 1 ms이며, out-click 신호는 약 0.25 ms로, in-click 신호보다 지속시간도 짧고 크기도 훨씬 작았다. 두 진동막의 시간차는 약 2 ms였다. Fig. 6(b)는 in-click과 out-click 신호의 FFT 결과이다. in-click 시에는 2nd 피크가, out-click 시에는 3rd 피크가 가장 크다. 이는 진동막이 함몰 시에는 2nd 피크에 해당하는 진동수가, 복원 시에는 3rd 피크에 해당하는 진동수가 발생할 가능성이 높다고 판단되었다. 그럼에도 복원 시 소리의 크기가 함몰 시에 비해 너무 작아 실질적 영향력은 무시할 수 있다고 판단된다.

3.3 진동막의 운동 분석

진동막은 소리를 발생시키는 주요 기관으로, 해부학적 특성을 알기 위해 실체현미경(Zeiss Axio zoom V16)으로 Z-stack 기능을 활용하여 Fig. 7과 같이 5장의 사진을 촬영 후 합성하였다. Fig. 7은 오른쪽 진동막으로, 사진

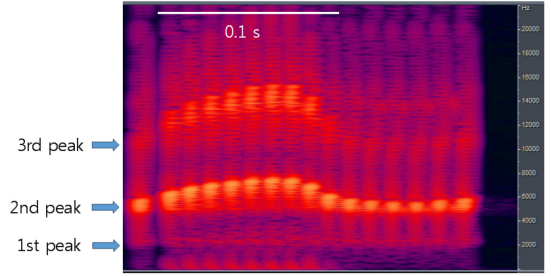


Fig. 5 Spectrogram of the scream

Table 2 FFT results of three peaks of 30 screams [unit: Hz]

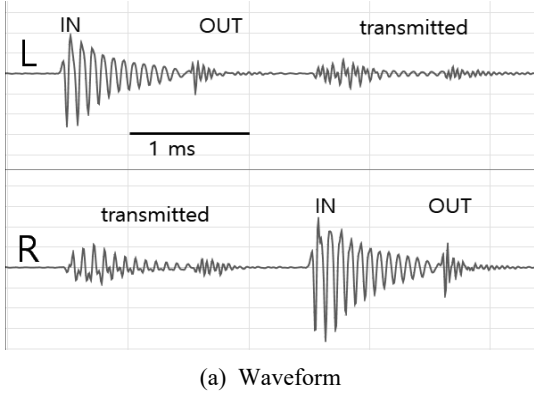
Number	1st	2nd	3rd
1	2190	5383	11 240
2	2239	5426	11 542
3	2326	5513	11 724
4	2326	5513	12 059
5	2369	5728	12 748
6	2412	5728	12 877
7	2412	5751	13 029
8	2412	5771	13 178
9	2455	5804	13 221
10	2455	5857	13 221
11	2455	5875	13 264
12	2489	5900	13 410
13	2489	5900	13 480
14	2498	5943	13 690
15	2541	6029	13 781
16	2541	6029	13 824
17	2541	6072	13 960
18	2624	6072	14 069
19	2627	6331	14 169
20	2627	6373	14 185
21	2627	6440	14 298
22	2627	6460	14 343
23	2627	6589	14 729
24	2670	6632	14 729
25	2670	6632	14 759
26	2670	6678	14 901
27	2799	6718	14 901
28	2799	6761	15 073
29	2824	6891	15 159
30	2827	6934	15 246
Mean	2539	6124	13 694
SD	167	459	1089
Ratio of mean	1	2.41	5.39
Ratio of SD	1	2.76	6.54

의 오른쪽이 머리쪽(head)이고, 위쪽이 등쪽(dorsal)이다. 발음근과 진동막을 연결하는 내돌기가 붙어있는 내돌기 구덩이(apodeme pit)와 진동판(tymbal plate) 안에

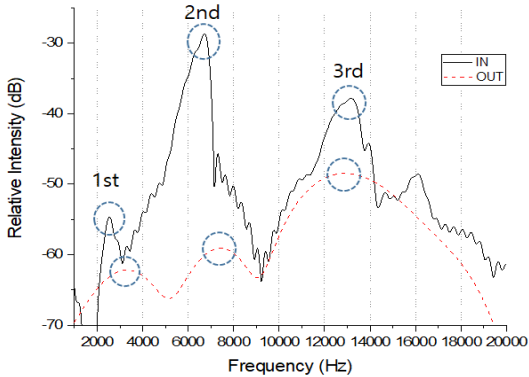
주름(wrinkle)이 선명하게 촬영되었다. 진동판의 오른쪽으로 세 개씩의 긴 갈비무늬(long ribs)와 짧은 갈비무늬(short ribs)가 관찰되었다.

초고속 사진을 분석한 결과, 진동막은 짧은 갈비무늬 3번을 꼭지점으로 하는, 진동이 가능한 최대한의 넓이로 한 가지 모드로만 진동하였다(Fig. 8 참조). 하나의 모드로 움직이는 것은 참매미와 같으며 세 가지 모드인 말매미와는 차이가 있다(7).

진동막이 진동하는 초고속 영상 중 200개를 임의 선택하여 진동수를 계산한 결과를, 200 Hz 범위로 군집하여 각 범위마다의 개수를 Table 3에 정리하였다. 진동막의 진동수는 약 5200 Hz ~ 7600 Hz 범위이며 평균 6253 Hz으로, 비명음의 평균 중심주파수인 6124 Hz와 유사하였다(Table 2 참조).



(a) Waveform



(b) FFT results of each in and out clicks

Fig. 6 Sound of both tymbals

3.4 복부의 공명 조건 분석

Fig. 9는 7마리의 유지매미 복부에 대해 sine sweep

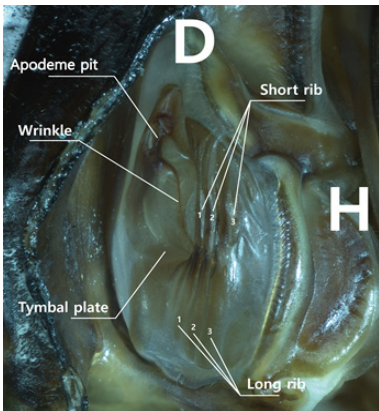
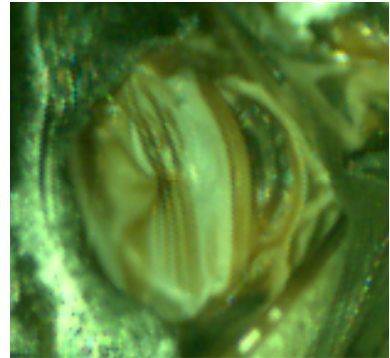
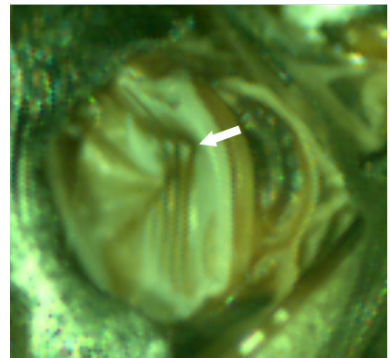


Fig. 7 Structure of the tymbal of the cicada *G. nigrofuscata*



(a) Before buckling



(b) After buckling during in-click

Fig. 8 Buckling process of the tymbal of the cicada *G. nigrofuscata*

Table 3 Number of data per range of frequency

Range of frequency [Hz]	Number of data [EA]
5200 ~ 5400	3
5400 ~ 5600	12
5600 ~ 5800	20
5800 ~ 6000	25
6000 ~ 6200	28
6200 ~ 6400	31
6400 ~ 6600	26
6600 ~ 6800	31
6800 ~ 7000	12
7000 ~ 7200	9
7200 ~ 7400	0
7400 ~ 7600	3
Sum	119

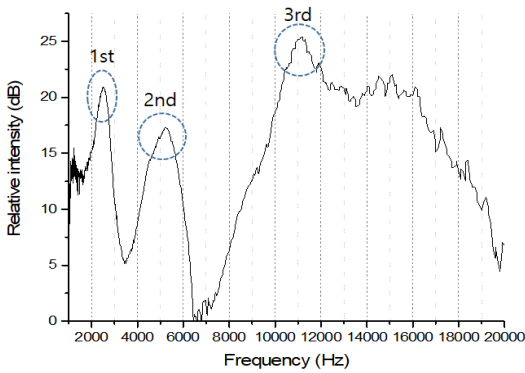


Fig. 9 Resonance condition of the cicada *G. nigrofuscata*'s abdomens

test한 결과에서 스피커의 공진특성을 각각 제거한 후, 주파수별 공진값을 평균 내어 그린 그래프이다. 공명되는 주파수 위치는 유인음의 주파수 분포와 유사하였다(Table 1 참조).

3.5 종합 분석

Fig. 10은 유지매미의 유인음·비명음·진동막 운동·복부 공명 조건에 대한 상대값·주파수 그래프를 모두 하나에 나타낸 것이다. 유인음 FFT 결과와 복부 공명 조건 결과에서의 1st, 2nd, 3rd 피크 위치가 거의 일치하였으며, 비명음 FFT 결과와 초고속 영상 분석 결과에서 2nd 피크가 일치하였다. 또한, 비명음의 중심

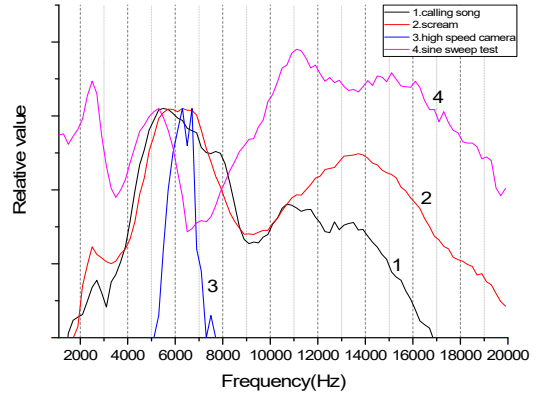


Fig. 10 Comparison of results of four experiments

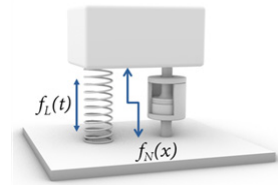


Fig. 11 Model of the helmholtz resonator included linear factor $f_L(t)$ and nonlinear factor $f_N(x)$

주파수가 유인음의 중심주파수에 비해 약 1000 Hz 정도 더 높게 나타났다. 유인음·비명음·복부 공명조건의 경우에는 모두 세 피크가 나타났지만, 진동막의 운동은 2nd 피크의 진동수만 발견되었다.

4. 저조파에 대한 비선형적 해석

Fig. 10의 결과를 종합하면 진동막은 2nd 피크에 해당하는 소리를 만들고 이의 2배 공진주파수가 3rd 피크에 해당한다. 1st 피크는 2nd 피크나 3rd 피크에 비해 크기가 매우 작아 간과하기 쉬운데, 이러한 피크가 유인음과 비명음에서 공통적으로 나타나기 때문에 2nd 피크의 저조파 성분으로 보고 이에 대한 해석을 위해 비선형 공명식을 도입하여 해석하였다.

Fig. 11은 Chang et al.이 소개한 비선형 댐퍼 모형을 재구성하여 그린 헬름홀츠 공명기의 상자 모형이다⁽¹⁹⁾. cos 함수를 갖는 선형의 가진 요소 $f_L(t)$ 에 미치는 비선형 요소 $f_N(x)$ 를 가미하여 비선형 상자 모형을 제안하였다. 전개 과정에서의 A~D는 임의의 비례상수를 의미한다.

선형의 강제 진동 요소 $f_L(t) = A\cos(\nu t)$ 에 비선형의 요소 $f_N(x)$ 가 더해지면 강제 진동의 미분방정식은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\ddot{x} + w_0^2 x = f_L(t) + f_N(x) \tag{1}$$

비선형의 일반 해는 식(2)와 같이 $x(t)$ 의 테일러 전개로 표현이 가능하다. 여기서 $\epsilon \ll 1$ 이다. 이 연구에서는 ϵ^2 부터는 너무 작은 값이라 무시하였다.

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0(t) + \epsilon x_0^2(t) + \epsilon^2 x_0^3(t) + \dots \\ &\simeq x_0(t) + \epsilon x_0^2(t) \end{aligned} \tag{2}$$

식(1)에서 비선형 항을 제외한 1차 섭동 해는 식(3)으로 표현이 가능하다.

$$\ddot{x}_0(t) + w_0^2 x_0(t) = A\cos(\nu t) \tag{3}$$

식(3)의 일반 해는 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_0(t) = A\cos(\nu t) + B\cos(w_0 t + \phi_0) \tag{4}$$

식(1)에 식(4)를 대입하여 다음의 식(5)로 정리하였다.

$$\begin{aligned} [\ddot{x}_0(t) + \epsilon \ddot{x}_0^2(t)] + w_0^2 [x_0(t) + \epsilon x_0^2(t)] \\ \simeq A\cos(\nu t) + f_N(x_0) \end{aligned} \tag{5}$$

식(5)에서 선형 항을 제외한 1차 섭동 해는 다음의 식(6)으로 표현 가능하다. a 는 임의의 계수이다.

$$\ddot{x}_0^2 + w_0^2 x_0^2 \simeq ax_0^2 \tag{6}$$

식(4)를 식(6)에 대입하여 전개하는 과정에서, 주 공명은 $w_0 \simeq \nu$ 일 때 일어나므로 비선형 항은 식(7)로 정리된다.

$$\begin{aligned} f_N(x_0) &= \epsilon x_0^2 = \epsilon AB\cos((\nu - w_0)t + \phi_0) \\ &\quad + C\cos(2w_0 t + \phi) + D \end{aligned} \tag{7}$$

$\ddot{x}_0^2 + w_0^2 x_0^2 \simeq \epsilon AB\cos((\omega_0 - \nu)t + \phi_0)$ 인 경우, $x_0^2(t)$

$\simeq A_1\cos((\nu - w_0)t)$ 로 정리될 수 있다. 이는 1차 섭동 해인 $x_0^2(t)$ 은 가진 주파수인 $\nu - w_0$ 에 공진되어 나타난다는 의미이다. $\nu - w_0 \simeq w_0$ 일 때 공진이 발생되므로 $w_0 \simeq \frac{\nu}{2}$ 라고 할 수 있다. 이는 헬름홀츠 공명기에 외부에서 ν 의 진동수를 갖는 소리를 가진했을 때, 그의 절반인 약 $\frac{\nu}{2}$ 에 해당하는 소리가 공명기 내에서 공진이 될 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결 론

이 연구에서는 유지매미가 유인음을 낼 때 어떻게 배음을 만드는 것인지 알아보고자 하였다. 실험 결과, 첫째, 유인음에서 2626 Hz, 5452 Hz, 11 134 Hz의 3개 피크가 발견되었다. 둘째, 비명음에서도 2539 Hz, 6124 Hz, 13 694 Hz의 3개 피크가 발견되었다. 셋째, 진동막의 운동은 1회 함몰과 1회 복원의 단일 모드 진동이며 진동수의 평균은 6249 Hz이었다. 넷째, 복부 공명 조건 실험에서도 유인음과 비명음에서 발견된 3개의 피크와 유사한 주파수 영역에서 3개의 피크를 발견하였다. 네 가지 실험 결과를 종합하면, 유인음·비명음·복부 공명 조건 모두 세 개의 피크가 나타나며 유인음과 복부 공명 조건은 피크의 위치가, 진동막의 진동수는 비명음의 2nd 피크의 값과 유사하였다. 공명을 일으키는 복부의 구조는 유인음을 더욱 효율적으로 크게 낼 수 있도록 진화했다고 판단된다. 유지매미의 진동막은 2nd 피크에 해당하는 진동수로만 진동을 하지만, 유인음과 비명음에서 3개의 피크가 모두 나타나는 것으로 보아 1st 피크와 3rd 피크는 복부의 공명에 의해 발생한다고 할 수 있다. 이 결과는 Yoon et al.에 의해⁽⁷⁾ 밝혀진 헬름홀츠 공명기 구조의 말매미와 참매미의 진동막이 진동수를 결정하고 복부는 증폭만 한다는 결과와는 다르게 유지매미는 같은 헬름홀츠 공명기 구조이면서도 진동막은 하나의 피크에 해당하는 주파수만 결정하고 복부가 다른 두 개의 피크를 결정한다는 것으로 판명되었다. 세 개의 피크 중 2nd 피크는 진동막의 진동수와 복부의 공명통이 헬름홀츠 공명기 역할을 하여 큰 소리를 내는 것으로 판단되며 3rd 피크는 이의 2차 고조파에 해당한다. 1st 피크는 크기가 작아 세밀하게 관찰하지 않

으면 간과하기 쉬운 데, 이에 대한 원인을 분석한 결과, 비선형 공진으로 인한 저조파로 판단되었다. 일반 매미의 복부가 기본주파수보다 고조파를 공명시킬 수 있는 것은 이미 알려진 사실이지만^(7,11), 저조파를 공명시킨다는 연구 결과를 본 적은 없어 1st 피크의 존재를 비선형 공명으로 해석하였다. 헬름홀츠 공명기상사 모형에 시간에 대한 선형 요소와 변위에 대한 비선형 요소를 더해 비선형 방정식을 설계하고 전개하여 $w_0 \approx \frac{\nu}{2}$ 임을 유도하였다. 이 식에서 Table 1에서 기재된 유인음의 1st 피크와 2nd 피크 평균값을 대입하면 $2626 \text{ Hz} \approx \frac{5452 \text{ Hz}}{2}$ 이므로 저조파의 발생 원인에 대해 비선형 해석이 설득력이 있다고 판단된다. 그러므로 <한국의 매미 소리>와⁽¹³⁾ <日本産セミ科図鑑>의⁽¹⁴⁾ 유지매미 소리에 대한 분석 내용은 2000 Hz 중반의 1st 피크를 유지매미가 내는 소리로 인정하고 2nd 피크의 저조파임을 명시하는 방향으로 수정될 필요가 있다.

후 기

이 논문의 완성도를 높이는 데 도움 주신 서상준 박사님(준택)과 신윤석 박사님(서울과학기술대학교)께 감사드립니다.

References

(1) Lee, Y. J., 2008, Revised Synonymic List of Cicadidae(Insecta: Hemiptera) from the Korean Peninsula, with the Description of a New Species and Some Taxonomic Remarks, Proceedings of the Biological Society of Washington, Vol. 121, No. 4, pp. 445~467.
 (2) Luo, C., Wei, C. and Nansen, C., 2015, How Do 'Mute' Cicadas Produce Their Calling Songs?, PLoS ONE, Vol. 10, No. 2, e0118554.
 (3) Lee, Y. J., 2003, On the Acoustic Signals of Cicadas(Hemiptera, Cicadidae), Lucanus, No. 4, pp. 5~8.
 (4) Yoon, K.-S., Seo, S. J. and Seo, J.-G., 2007, Asymmetry Actions of Tympana & Resonance Condition in Air Sac of the Cicada *Cryptotympana atrata*, The

Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 1~7.

(5) Song, X., 2022, Cicada-inspired Sound Generator with Dual Resonators, Temple University, Doctoral Dissertation, PA, United States, pp. 86~88.

(6) Bennet-Clark, H. C., 1999, Resonators in Insect Sound Production: How Insects Produce Loud Pure-tone Songs, The Journal of Experimental Biology, Vol. 202, No. 23, pp. 3347~3357.

(7) Yoon, K., Cho, S., Jung, Y. and Lee, D., 2018, Identification of Frequency Determining Sound Generating Organ of Cicadas with the Helmholtz Resonator Structure, The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 37, No. 5, pp. 276~283.

(8) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2000, Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, John Wiley & Sons, NY, United States, Chapter 10, Pipes, Resonators and Filters, pp. 272~301.

(9) Bennet-Clark, H. C. and Young, D., 1998, Sound Radiation by the Bladder Cicada *Cystosoma saundersii*, The Journal of Experimental Biology, Vol. 201, No. 5, pp. 701~715.

(10) Young, D., 1990, Do Cicadas Radiate Sound through their Ear-drums?, The Journal of Experimental Biology, Vol. 151, No. 1, pp. 41~56.

(11) Yoon, K. S., Seo, S. J., Seo, J. G. and Park, K. J., 2011, Resonance Condition of the Cicada *Oncotympana fuscata*'s Abdomen, Proceedings of the Acoustical Society of Korea Annual Autumn Conference, pp. 223~228.

(12) Lee, Y. J., 2005, Cicadas of Korea, Geobook, Seoul, Korea, pp. 70~73.

(13) Kim, K. K., Kim, S. J., Kim, T. W., Seo, H. L., Seong, K. S. and Yoon, K. S., 2013, Sound of the Cicadas in Korea, National Institute of Biological Resources, Incheon, Korea, pp. 99~103.

(14) Hayashi, M. and Saisho, Y., 2011, The Cicadidae of Japan, Seibundo-shinkosha, Tokyo, Japan, pp. 99~103.

(15) Kim, S. J. and Song, J. H., 2017, The Encyclopedia of Korean Cicadas, Jayeongusaengtae, Seoul, Korea, pp. 56~63.

(16) Kim, Y.-J. and Ki, K.-S., 2021, A Study on the Emergence Period and Geographic Distribution of Cicadinae(Hemiptera: Cicadidae) in Korea using Bioacoustic

Detection Technique, Korean Journal of Environment and Ecology, Vol. 35, No. 6, pp. 594~600.

(17) Moriyama, M. and Numata, H., 2008, Diapause and Prolonged Development in the Embryo and Their Ecological Significance in Two Cicadas, *Cryptotympana Facialis* and *Graptopsaltria Nigrofuscata*, Journal of Insect Physiology, Vol. 54, No. 12, pp. 1487~1494.

(18) Fonseca, P. J. and Bennet-clark, H. C., 1998, Asymmetry of Tymbal Action and Structure in a Cicada: A Possible Role in the Production of Complex Songs, The Journal of Experimental Biology, Vol. 201, No. 5, pp. 717~730.

(19) Chang, S. I., Song, D.-G. and Choi, J.-K., 2002, Bifurcation Analysis of a Non-linear Hysteretic Oscillating System, Transactions of the Korean Society

for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 57~64.



Ki-sang Yoon received his B.S. degrees in physics education from Kongju National University in 1999, M.E. degrees Environment Education from Kongju National University in 2002, Ph.D. in Environment Science from Kongju National University in 2008 and M.E. degrees Physics education from Korea National University of Education in 2010. He is currently a science teacher of Sejong city.