

매미의 발음 기제를 모사한 음향 발생 장치의 설계에 관한 연구

조완호, 이정권

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

A Study on the Design of an Acoustic Actuator Based on the Singing Mechanism of Cicadas

Wan-Ho Cho, Jeong-Guon Ih

NoVic, Department of Mechanical Engineering, KAIST, Science Town, Daejeon 305-701, Korea

Rosa.Chinensis@gmail.com, J.G.Ih@kaist.ac.kr

요약

본 연구에서는 매미가 소형이면서도 광대역의 소리를 낼 수 있는 원리가 무엇인지를 파악하고 이중 음향 발생 장치 제작에 적용할 수 있는 요소를 도출하였다. 매미의 발음기관에서 가장 중요한 부분은 복부 공명실과 진동판이다. 복부 공명실은 위상 반전형 인클로져 시스템으로 모델링 할 수 있으며, 진동판은 돔 형태의 박판으로 볼 수 있다. 근육에서 발생된 입력 신호는 진동판의 곡면에 의해 판에 좌굴을 일으켜 높은 음압의 소리를 발생시킨다. 발생된 소리는 복부를 통해 위상이 반전되어 특정 대역이 강조된다. 진동판의 가장 큰 특징은 곡면구조에 의한 비선형적인 출력이며 이를 통하여 가진 주파수와 상이한 주파수 성분들을 효과적으로 발생시키게 된다. 이러한 구조를 음향 발생장치로 활용하기 위하여 단순한 곡면판의 기하학적 파라미터 변화에 따른 출력 변화 경향을 관찰 하였으며, 이러한 원리를 활용한 음향 발생장치를 구성하였다.

1. 서론

곤충 소리 중 매미의 소리는 다른 곤충들과 구분되는 특성을 지닌다. 일반적으로 매미의 소리는 곤충들 중에서 가장 크다고 알려져 있으며[1] 주파수 특성도 순음이 아닌 광대역이다. 이러한 특성 때문에 매미의

발음기관은 음향 발생장치 제작에 유용한 아이디어를 제공 할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 매미의 발음기관에 대해 알아보고 이를 통하여 소형이면서 높은 음압 레벨을 얻을 수 있는 시스템을 만들기 위한 아이디어를 찾아 구현해 보고자 한다.

본 연구에서는 매미의 소리와 구조에 대한 기본적인 사항에 대해 기술하고 발음기관의 핵심요소를 도출하였다. 그리고 발음기관의 음향학적 상사기관을 제시하고 이를 통하여 음향발생 장치를 제작하여 그 특성을 관찰 하였다.

2. 매미의 음향 특성

2.1 매미에 관한 기존 연구

매미는 그 독특한 음향특성 때문에 일찍부터 활발한 연구가 이루어져 왔다. 매미 복부의 공기주머니에 대해서는 19세기부터 많은 학자들이 관심을 가지고 연구하였으며 [1], 이것이 공명기로 작용 한다고 제안되었다. 1990년에 Young은 매미 복부가 Helmholtz 공명기로 작용한다고 제안하였다 [1].

최근까지 매미의 소리는 복부에 의해 전파 된다고 알려져 왔으나, Young은 진동판이 더 주된 방사체라고 제안 하였다 [1]. Young과 Bennet은 매미의 진동판 (tymbal)이 각질로 된 뼈대와 섬유질로 구성된 다

자유도계 시스템이라고 가정하고 이 시스템의 공진 주파수가 매미 소리의 중심 주파수임을 보였다 [2,3].

2.2 매미 소리의 음향 특성

매미소리의 주파수 범위는 일반적으로 4 kHz ~ 15 kHz 범위에 위치하며 크기가 작을수록 높은 소리를 낸다. 이들은 크게 단조로운 소리를 내는 것과 소리가 변화하면서 하나의 곡을 이루는 것으로 나눌 수 있다.

본 연구에서 관찰한 종은 말매미, 애매미, 털매미의 3 종이다. 말매미는 변화 없이 단조로운 소리로 우는 종으로 매미 중에서는 가장 체구가 크며 (몸길이 43 mm) 가장 높은 음압을 나타내는 주파수는 5~6 kHz 부근이다. 애매미는 하나의 곡 형태를 가지고 노래하는 종으로써 말매미에 비해 크기가 작은 편이고 (30 mm) 중심 주파수는 곡에 따라서 계속 변하게 된다. 털매미는 애매미 보다 작은 크기로 (24 mm) 단조로운 소리를 내며 말매미 보다 높고 깨끗하여 중심 주파수는 7~8 kHz 에 위치한다. 각 매미의 주파수 특성은 그림 1 과 같다.

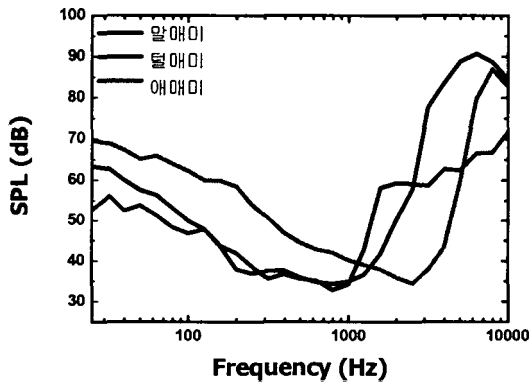


그림 1. 매미소리의 주파수 특성.

2.2 매미 발음기관의 구조

매미의 기본적인 내부구조는 종마다 유사하며 같은 종의 경우 각 부분의 크기 비도 일정한 비율을 유지한다 [4]. 매미의 배 부분은 독립된 발음기관을 이루는데 복부 아래쪽의 2 개의 구멍이 있으며, 이 구멍은 겹테기 (operculum)로 덮여 있다. 이것을 들어내면 얇은 막 (tympanum)과 각질의 골격이 보이게 된다. 내부는 빈공간을 이루고 있으며 그림 2 와 같은 항아리 모양이다.

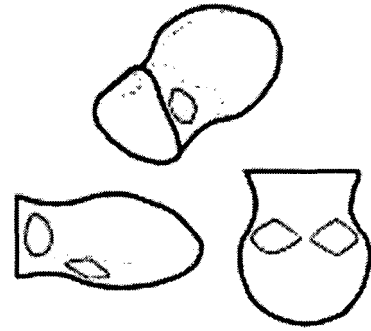


그림 2. 매미 복부의 내부 공간.

매미의 진동판은 항아리의 목 부분에 위치하고 있으며 모양은 그림 3 과 같다. 진동판은 둥 형태의 얇은 판이라고 할 수 있으며, 섬유질의 막에 활 모양으로 된 각질의 뼈대 (rib)가 붙어 있다.

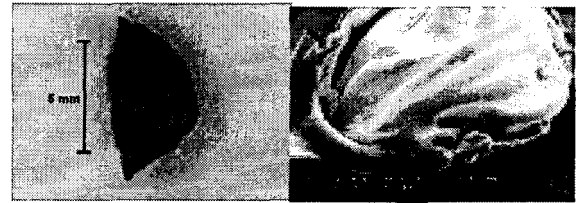


그림 3. 매미의 진동판

3. 매미 발음기관의 상사 모델

3.1 복부 공명실의 상사 모델

매미의 복부 아래쪽에 위치하는 박막은 그림 4 에서 보이는 바와 같이 1~2 μm 정도의 매우 얇은 막이다. 그러므로 이 부분은 외부로 뚫려 있는 것으로 간주 할 수 있다.

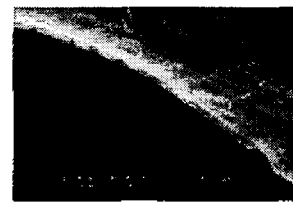


그림 4. 매미 복부 박막(tympanum)의 단면.

그러므로 매미 시스템은 진동판에 의해 직접 방사되는 부분과 공명실을 거쳐서 방사되는 2-way 시스템으로 볼 수 있다. 이러한 시스템은 위상 반전형 인클로저 시스템 (bass-reflex enclosure system)의 전형적인 형태로 그림 5와 같은 회로로 표현할 수

있다.[5] Z_s 와 Z_p 는 박스의 임피던스이며 Z_c 는 포트(구멍)의 임피던스 Z_b 는 진동판의 방사 임피던스를 나타낸다. 이 회로 모델의 임피던스는 다음식과 같이 주어진다:

$$Z_{in} = Z_s + \frac{Z_c \cdot (Z_c + Z_b)}{Z_c + Z_c + Z_b} \quad (1).$$

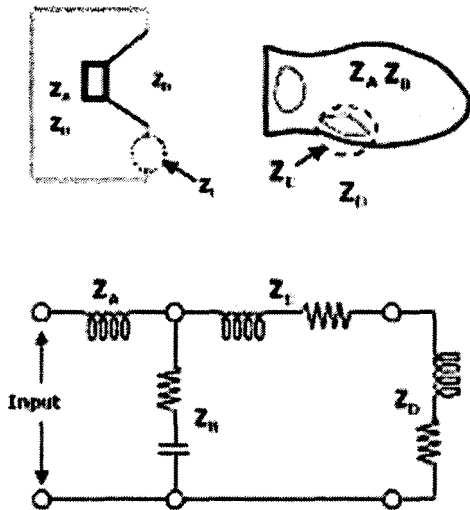


그림 5. 위상반전형 인클로져 시스템의 회로모델.

이 식을 이용하여 매미의 복부의 임피던스를 구하면 그림 6 과 같다. 이 결과에서 보면 털매미는 8 kHz 에서 피크가 나타나는 것을 관찰 할 수 있으며 말매미는 5 kHz 에서 피크가 나타난다. 털매미의 경우는 가장 높은 음압을 나타내는 주파수(7~8 kHz)와 거의 일치하며 말매미(6 kHz)는 약간 어긋나 있으나 높은 음압을 내는 대역 내에 위치한다.

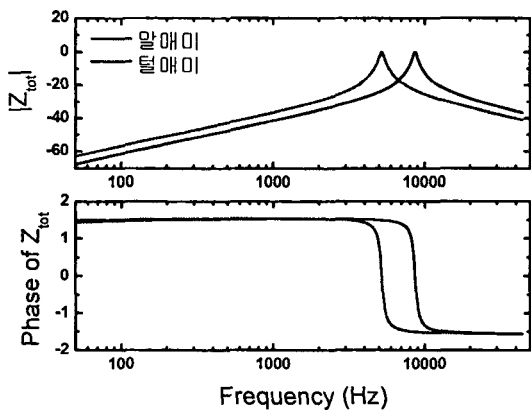


그림 6. 매미의 복부의 음향 임피던스.

3.2 진동판의 단순 모델

매미의 진동판과 그 가진 시스템은 그림 7.(a)와 같은 구조를 갖는다. 이러한 시스템은 곡면판에 좌굴이 발생할 때 발생하는 대변위 변형에 의하여 판이 가지고 있는 다양한 공진 주파수 성분들이 나타나게 된다고 볼 수 있다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 그림 7(b)와 같은 곡면판 시스템을 제작하였다.

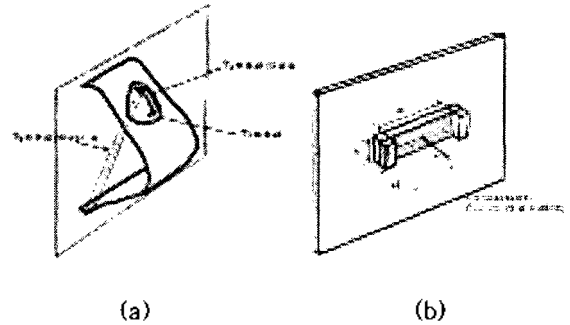


그림 7. (a) 매미의 진동판 가진 시스템, (b) 곡면판 가진 시스템.

사용된 판은 두께 0.1 mm 의 알루미늄으로 면적은 100 x 50 mm, 곡률반경은 75 mm 였다. 곡면은 고정단으로 하고 중심에 40 Hz 사인파 입력을 가해 주었다. 산호의 크기를 2.9 N ~ 8.3 N 범위에서 변화시켜 가면서 출력 음향 파워를 관찰한 결과는 그림 8 과 같다. 입력 신호의 크기가 증가함에 따라서 고주파 성분의 음향 파워가 급격히 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

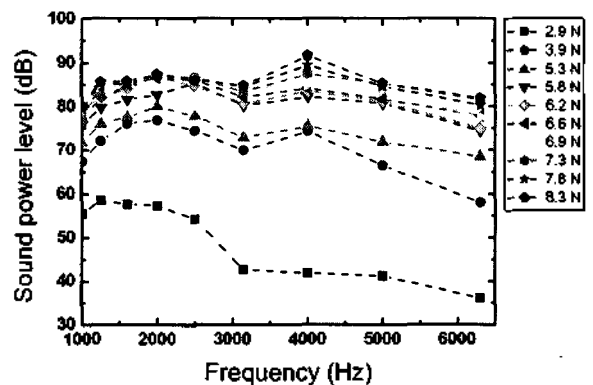


그림 8. 곡면판 시스템의 음향 파워.

4. 매미 발음기관 특성을 이용한 음향 발생장치

매미 발음 기관은 곡면판 가진 시스템과 위상반전형 인클로저의 조합으로 간단히 설명할 수 있다. 이를 이용하여 음향 발생장치를 구성하여 보았다.

사용한 진동판은 두께 0.07 mm, 테두리 직경 8 mm, 곡률반경 23.6 mm 의 돔형 판으로 재료는 인칭동이다. 이러한 평판에서 좌우 외곽 테두리에서 1 mm 안쪽으로 들어온 지점은 집게로 잡아 고정하였으며 한쪽 집게에는 모터를 이용하여 40 Hz 주기로 토크를 가하였다. 이러한 시스템의 공진 주파수는 1 차 모드부터 4.3 kHz, 6.6 kHz, 7.0 kHz 그리고 1.4 kHz 이상의 고주파로 얻어졌다. 출력된 음압을 관찰하면 이 공진 주파수 부근에서 높은 음압레벨이 나타나는 것을 확인 할 수 있다 (그림 10). 공명실을 사용하였을 경우에는 특정 주파수 대역에서 음압 레벨이 증폭 되는 것을 관찰 할 수 있다. 공명실은 플라스틱으로 된 시약병을 사용하였으며 공진 주파수는 5.5 kHz 였다.

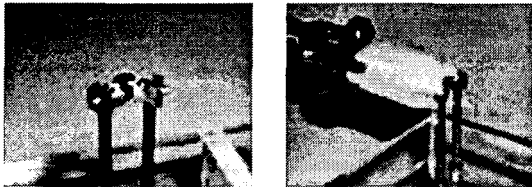


그림 9. 매미발음기관 특성을 이용한 음향 발생장치.

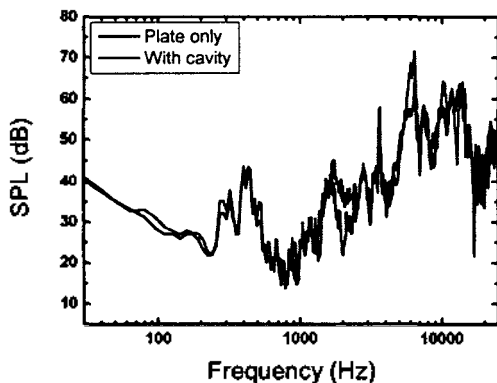


그림 10. 제작된 시스템의 출력음압.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 매미의 발음기관의 특징을 관찰 하고 이를 간단한 상사 모델로 근사하였으며 이를 이용한 음향 발생장치를 구성하여 보았다. 매미의 복부는 위상 반전형 인클로저 시스템으로 볼 수 있으며, 진동판은 곡면을 갖는 얇은 판에 반복적으로 좌굴을 발생시켜 소리를 발생시키는 시스템으로 볼 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 단일 주파수 신호를 통해 광대역의 음향 출력을 얻을 수 있었다. 추후에는 이러한 시스템의 실용화를 위하여 출력 주파수와 음압을 의도대로 정하는 방법에 대해 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

1. D. Young, "Do cicadas radiate sound through their ear drums?," *J. Exp. Biol.* **151**, pp. 41-56 (1990).
2. D. Young and H. C. Bennet-Clark, "The role of the tymbal in cicada sound production," *J. Exp. Biol.* **198**, pp. 1001-1019 (1995).
3. H. C. Bennet-Clark, "Tymbal mechanics and the control of song frequency in the cicada *cyclochila australasiae*," *J. exp. Biol.* **200**, pp. 1681-1694 (1997).
4. H. C. Bennet-Clark and D. Young, "A model of the mechanism of sound production in cicadas," *J. Exp. Biol.* **173**, pp. 123-153 (1992).
5. L. L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill Book Co. (1954), Chap. 8.