

인체와 성덕대왕 신종의 진동 특성 비교 연구

전 종 원[†] · 진 용 옥^{††}

요 약

본 논문은 성덕대왕 신종과 인체의 진동특성의 상관관계를 분석함으로써 인체의 진동 특징 추출의 새로운 방안을 도출하기 위한 연구이다. 신종의 종, 음통, 울림통과 기타 비대칭적 요소들을 인체의 몸체 성도, 횡격막과 인체구조의 비대칭적 요소들에 대비시켜 각각의 음향 특성들을 실험을 통하여 비교 분석하였다. 실험결과, 대비시킨 각 요소들의 음향 특성이 매우 흡사하여, 신종의 소리 특성에 관한 정보가 인체의 진동 전달 특성을 분석하는 데 있어서도 매우 유용하게 적용될 수 있다는 것을 확인하였다.

A Study on Comparison between the Vibration Characteristics of the King Songdok Bell and the Human Body

Jong-Won Jeon[†] · Yong-Ohk Chin^{††}

ABSTRACT

This paper is a study to find a new method of feature selection for vibration of human body by analyzing correlation of vibration between King Songdok Bell and Human body.

The vibration characteristics are analyzed by matching body, vocal tract, diaphragm and asymmetrical elements of human body with Bell, resonator, hole in the ground and asymmetrical elements. In the result, the characteristics of sound vibration of King Songdok Bell is useful to apply it to vibration characteristics of human body because the vibration characteristics of each elements is alike

1. 서 론

성덕대왕 신종은 역사적으로나 규모면에서 세계적이며, 그 소리의 신비로움으로 인하여 많은 학자들의 연구 대상이 되어왔다. 마침내 1996년 국립경주박물관 주관하에 신종의 다양한 데이터 수집이 이루어졌고, 종소리의 비밀이 점차 밝혀지고 있다[1, 3, 5].

본 논문에서는 지금까지 알려진 신종의 진동 특성을 인체의 진동 특성과 비교 분석하였다. 성덕대왕 신종과 인체의 상관관계를 알아보기 위해 인체를 종방향,

횡방향으로 일정한 간격으로 나누어 데이터를 수집하였으며, 신종의 비대칭성에 의한 음의 방사특성과 맥놀이의 발생 과정, 음통과 울림통(항아리)의 역할을 인체와 각각 대응시켜 분석하였다.

인체는 몸체 중앙의 횡격막을 사이에 두고 흉강과 복강으로 구분되며 흉강은 위로 성도와 연결되어 있어서 목소리를 낼 때는 공기와 함께 흉강의 일부 음이 입을 통해 빠져나간다 또한 횡격막은 목의 성대와 마찬가지로 벽을 이루어 흉강에서의 저주파 음을 증폭시키는 역할을 한다. 기존의 신종에 관한 연구결과[1, 3, 5]와 비교할 때 신종의 종부분은 흉강이고, 음통은 성도이며 울림통(항아리)은 횡격막과 복강에 해당한다고 볼 수 있다.

† 성 회 원 성지영서대학 전자계산과 교수

†† 강 회 원 . 경희대학교 전자공학과 교수

논문접수 : 2000년 9월 6일, 심사완료 : 2000년 10월 16일

성덕대왕신종의 가장 큰 특징은 맥놀이파의 발생이다 이와같은 맥놀이파의 발생 원인은 종의 비대칭성에 있는 것으로 알려져 있으며 구조적으로 질량불균일과 종의 외부 문양등을 근거로 제시하였다. 인체의 경우, 몸체 골격은 좌·우가 서로 대칭을 이루면서 앞·뒤는 서로 다르고, 내부적으로도 폐는 좌·우 한 쌍을 이루지만 크기와 무게가 서로 같지않다. 폐의 무게는 우폐가 약 625g, 좌폐가 약 567g 정도로 8:7 정도 우폐가 약간 크고 무겁다[6].

신종이 64Hz 기본 진동수를 갖고 있듯이, 인체는 각 장기마다 고유의 공진 주파수를 갖고 있어서 외부의 진동이 가해지면 진동수에 따라 장기에 해를 주기도 하고 도움을 주기도 한다. 이와 관련한 연구로 소음과 진동, 음성치료등의 연구가 이루어지고 있다[7, 8, 9, 12]

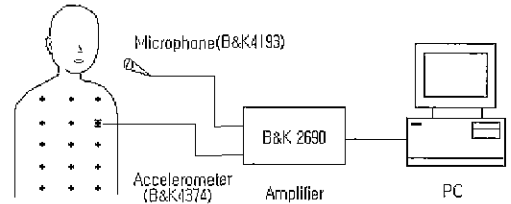
2장에서는 인체로 부터 데이터를 수집한 과정에 대해서 소개하였고, 3장에서는 인체의 각 부위에서의 진동 에너지, 기본진동수의 특성, 성대와 횡격막에 관한 영향을 실험결과를 통해 제시하였으며, 맥놀이 형성과정과 고유 진동수를 비교분석하였다

2. 인체의 진동신호 측정 방법

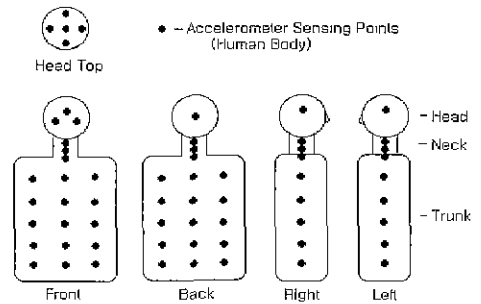
성덕대왕신종을 타종하는 것과 마찬가지로 인체에 진동을 발생시키기 위해 음성을 이용하였다 음성중에서도 모음이 자음보다 많은 진동을 발생시키며 공진특성이 잘 나타난다. 따라서 대표 모음 '아', '에', '이', '오', '우'를 발생하도록 하여 그 음성과 함께 인체 각 부위에 전달되는 진동 신호를 측정하였다 데이터 입력 장치로는 (그림 1)과 같이 마이크로폰(B&K4193)과 가속도계(B&K4374)를 사용하였으며 증폭기는 NEXUS(B&K2690)를 사용하였다

인체 진동신호 측정을 위한 측정위치로 총 63개를 설정하였다. 먼저 신체를 (그림 2)와 같이 머리, 목, 몸통으로 분류하여, 머리 부분에서는 머리 위에서 5곳, 안면에서는 이마와 광대뼈등 3곳, 측면에서는 귀 윗부분 그리고 뒷면은 1곳에서 추출하였다 목에서의 구간은 성대(Vocal cords)를 기준으로 위와 아래 부분 그리고 성대 위치이고 전, 후, 좌, 우 같은 방식으로 데이터를 추출하였다. 몸통(Trunk)에서는 앞, 뒤(등) 각각 15곳, 양측면은 중방향으로 5곳을 표본 추출 위치로 설정하였다. 음성신호는 음원을 발생시키고와 더불어

인체 내부 음향신호를 분석하기 위한 기준 신호로 사용하기 위해 동시에 저장하였다



(그림 1) 전체 측정 시스템



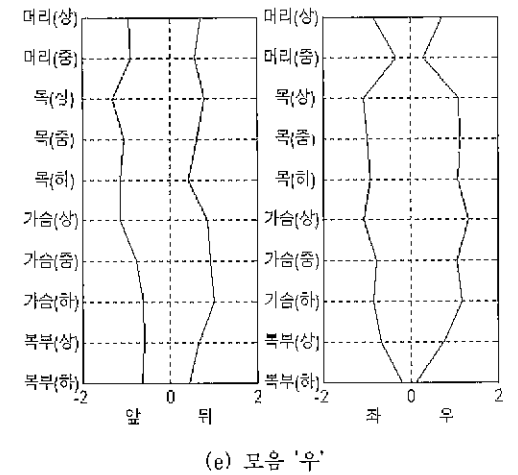
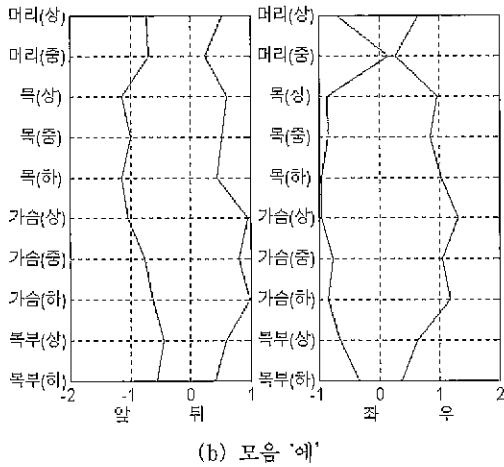
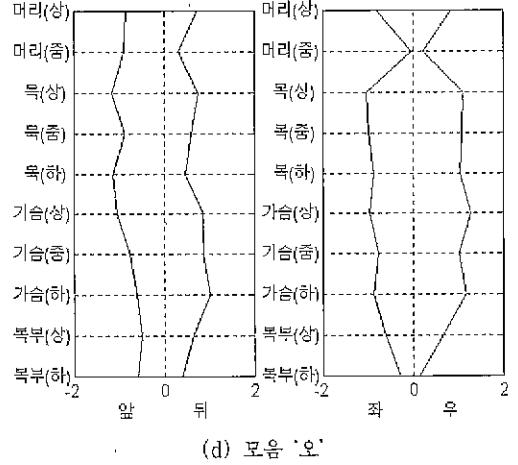
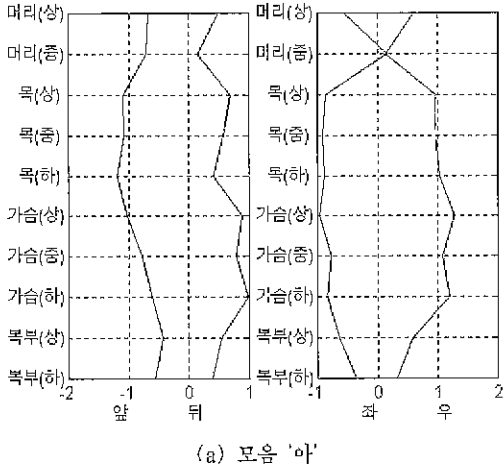
(그림 2) 진동신호 측정 위치

3. 신종과 인체의 진동 특성

3.1 기본 진동수의 특성

기본 진동수의 크기는 인체의 각 위치에 따라 크기의 변화가 심하지 않았다. 따라서 기본 진동수는 인체 전체에 걸쳐 고르게 전달된다는 것을 알 수 있다. 인체 앞면에서는 목을 제외하고 가슴 상단부가 가장 큰 값을 갖는다. 목 부분과 가슴 상단 부분을 기점으로 머리와 배 밑으로 갈 수록 크기가 감소하며 뒷면(등)에서는 폐가 있는 가슴 부위에서 가장 큰 값으로 나타났다. 좌측에서는 목과 가슴 부위에서 고르게 큰 값을 가지며, 귀 부위에서는 매우 미약한 신호가 검출되었다.

인체의 좌·우를 비교했을 때 서로 비대칭이었으며 좌측에 비해 우측 가슴 부위에서 상대적으로 큰 값을 갖는다. 모음에 따라 비교하면 '아', '에'는 머리 부분보다 가슴 부분에서 큰 에너지 값이 나타났고, '이'에서는 머리 부분이 가슴부위의 에너지 값보다 크며 다른 모음에 비해 약간 다른 특성을 보였다.

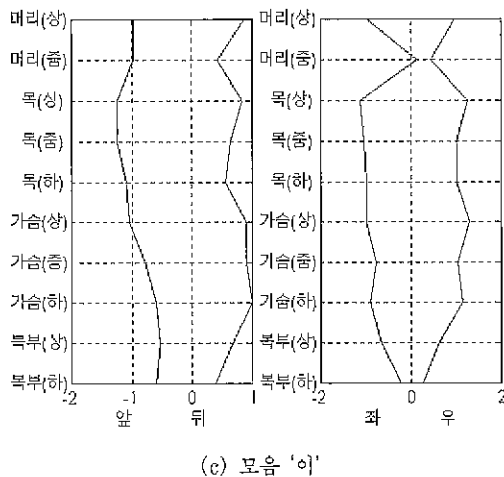


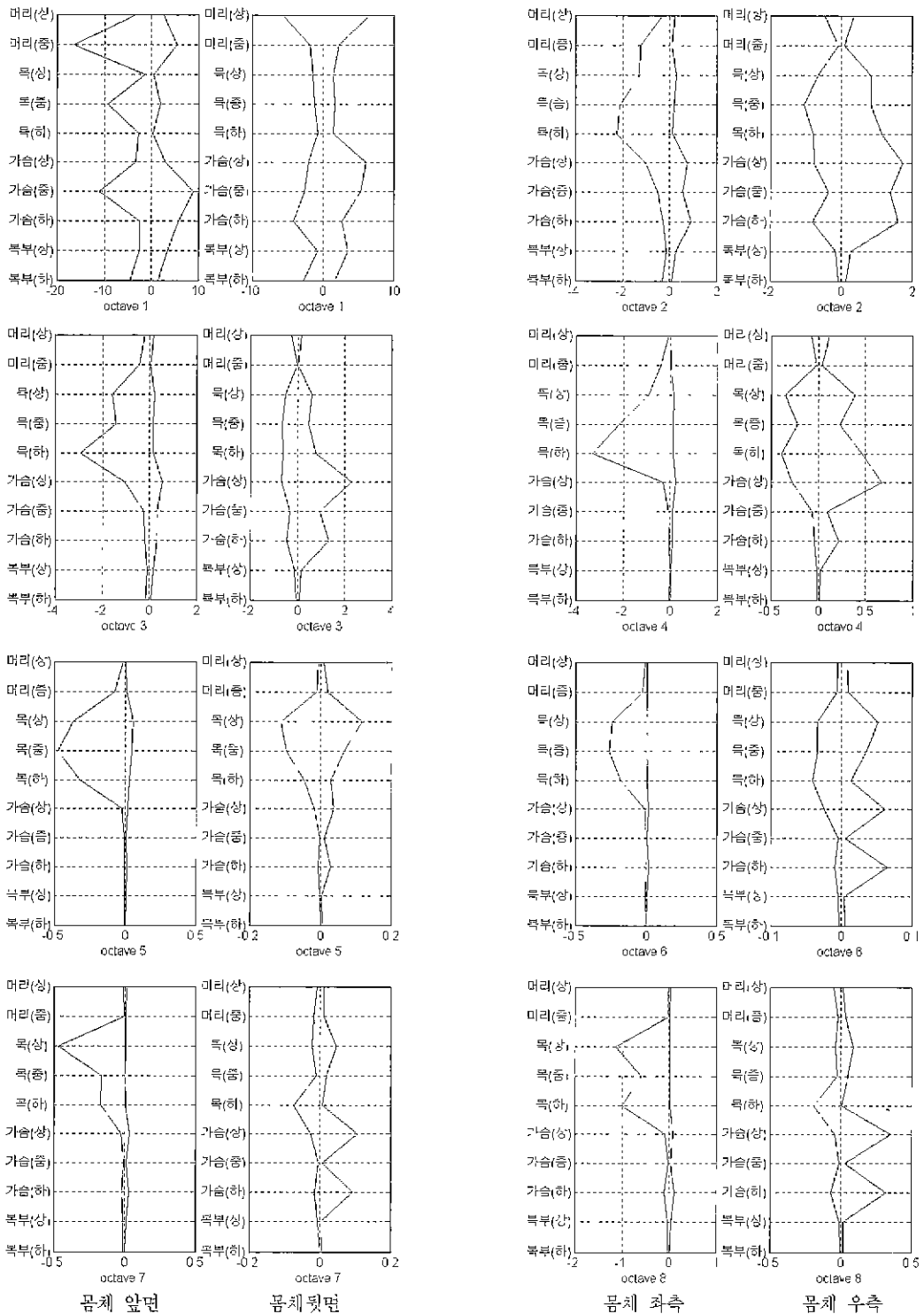
(그림 3) 기본 진동수의 크기

32 진동 에너지 분포

표본 구간으로 정한 위치에서 진동 에너지 값을 측정하였다. 효과적인 분석을 위해 주파수 대역을 8옥타브로 나누었으며, 이때의 중심주파수(Characteristic frequency)는 2^n ($n=4, 5, \dots, 11$)로 하였다. 신체를 앞, 뒤와 좌, 우로 나누어 비교하면 (그림 4)와 같다.

몸통(Trunk)에서는 위로 갈수록 에너지가 늘게 나타났다. 배(Belly)로 갈수록 에너지 값이 감소하는 경향을 보였으나 요철과 같은 굴곡의 형태로 나타났다. 이 결과는 신종의 음압의 분포가 밀소밀소 형태를 이루는 것과 같은 결과이며, 저주파 음의 파형 중첩이





(그림 4) 신체 부위별 에너지 분포(모음 '아'의 경우)

발생하는 형태로 볼 수 있다. 또한 우측이 좌측보다 에너지가 높게 나타났다. 성대 부위에서는 주파수 대역이 어느정도 올라 가면서 성대 아래보다 윗 방향으로 에너지 방사가 크다는 사실을 확인하였다. 옥타브 5대역에서는 상·하가 비슷한 크기를 보였으며 이것을 기준으로 옥타브 1-4대역의 상대적으로 저주파 대역에서는 성대 아래에서 진동에너지가 크고, 옥타브 6-8대역에서는 성대 위쪽에서 크게 나타났다. 옥타브 1에서는 목에서 보다 가슴에서 많은 에너지 값을 나타내. 횡격막에 의한 진동의 증폭작용은 저주파 성분에 집중한다는 것을 확인하였다. 이것은 신종의 움푹이 종 내부로부터 고주파 성분을 방출하며, 울림통이 저주파 성분을 모으는 역할을 하는 것에 비유할 수 있을 것이다.

3.3 결집음폭대(Formant)의 특성

지금까지의 성대대왕 신종의 연구는 여음 성분에 초점을 맞춰 왔다. 그러나 인체의 경우 목소리를 내기 위해 발성기관들의 개폐가 일어나서 묵음구간(mute)이 있고 떨림음(vibration)을 내는 것도 자연스러운 상태라고 볼 수 없기 때문에 신종의 충격파와 과도기음, 여음을 인체내의 진동파와 비교하였다.

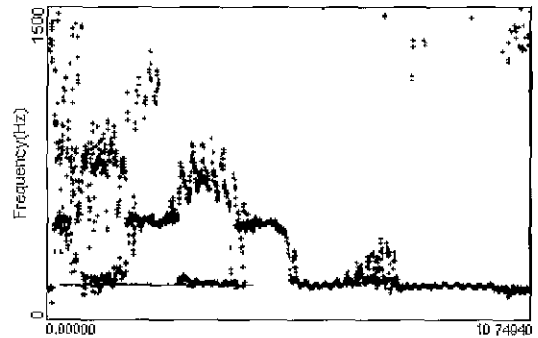
신종의 결집음폭대를 보면 어음이 있기까지의 과도기 상태에서는 주기적으로 반복되는 형태를 보이다 기본 진동수 근처에 집중되는 것을 볼 수 있다. 이것을 시간대별 파형과 스펙트럼으로 표시하면 (그림 7)과 같다

인체에서 목과 가슴,복부 순으로 진동파의 결집음폭대를 신종과 비교했을 때 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 목에서는 신종의 타종 직후의 초기 파형에서 나타나는 형상과 유사했으며 가슴 상단과 복부 상단에서는 과도기 상태의 특성을 보였다. 가슴중간과 하단 그리고 복부 하단에서는 기본 진동수를 중심으로한 결집음폭대(Formant) 특성을 보였다

결집음폭대의 분석에서 프레임 길이(Frame length)는 20msec였으며, 프레임 이동(Frame advance)는 10mscc, 필터차수(Filter order)는 12차, 대역폭 제한(Bandwidth limit)은 500Hz로 하여 실험하였다.

성대대왕 신종의 경우 진동 음향의 고유 주파수가 첫 번째 모드에서는 64Hz이고 두 번째 모드에서는 168Hz인 것으로 알려져 있다[1, 3, 5]. 이것을 인체의 경우와 비교하면 첫 번째 고유 진동수 모드는 생체 고유 진동수로 볼 수 있으며 약 10-20Hz 범위에서 존재한

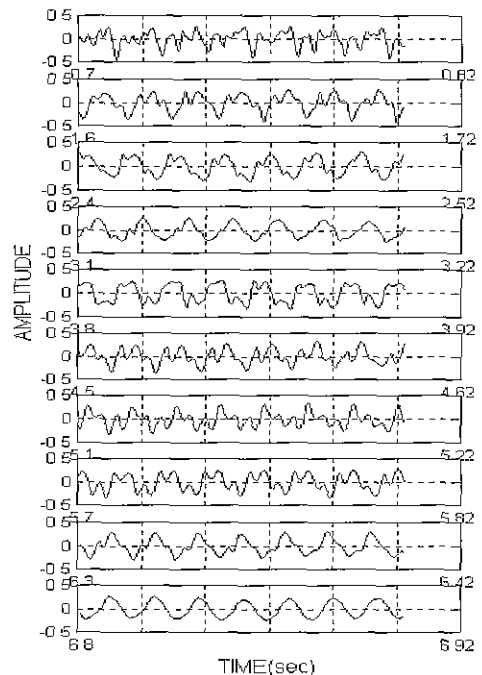
다. 두 번째 진동 모드는 외부적인 영향에 의한 것으로 경우에 따라 다르게 나타나겠지만 음성의 경우 음성의 기본 진동수가 남아 형성되는 것으로 실험결과 나타났다.



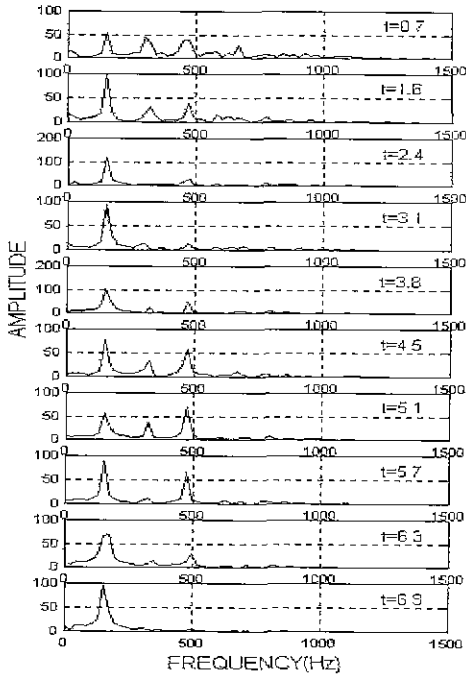
(그림 5) 신종 음파의 결집음폭대



(그림 6) 신종의 파형

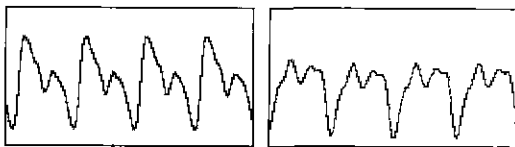


(a) 시간대별 파형



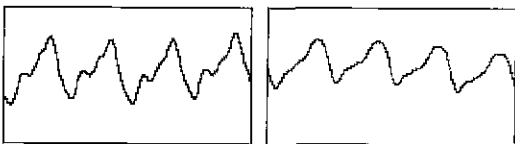
(b) 시간대별 스펙트럼

(그림 7) 성덕대왕신종의 시간대별 파형과 스펙트럼



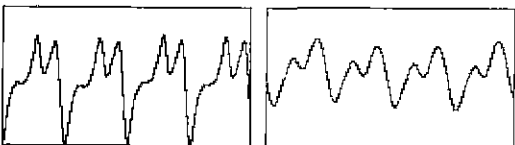
(a) 목

(b) 가슴(상)



(c) 가슴(중)

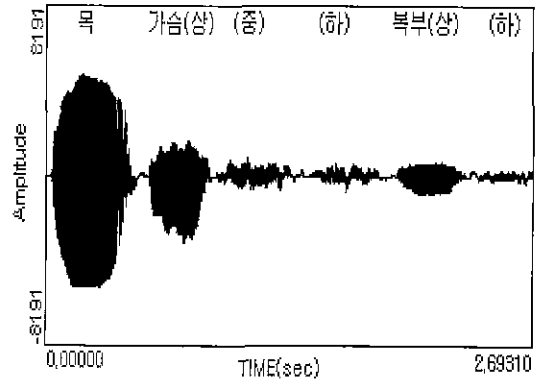
(d) 가슴(하)



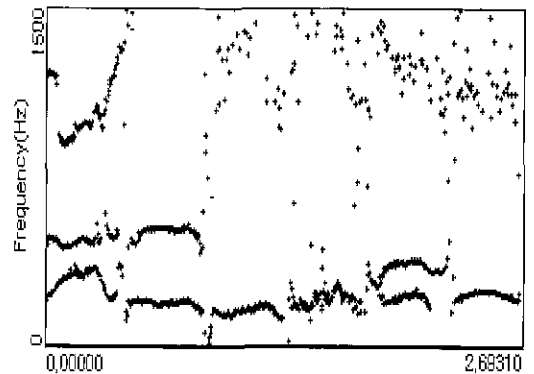
(e) 복부(상)

(f) 복부(하)

(그림 8) 물체 진동 파형((그림 9) 확대신호)



(그림 9) 물체 진동파

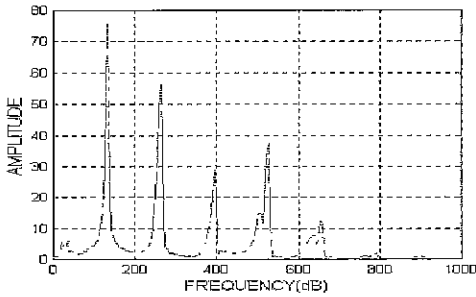


(그림 10) 인체 진동파의 결집음폭대

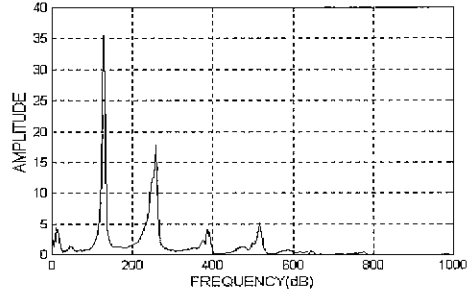
3.4 인체의 고유 진동수

신체의 장기는 골격에 유연하게 붙어있으며, 각각 고유 진동수를 갖고 있다. 이 때 우리 몸에 진동이 가해지던 공진이 생기고 불편함이나 통증을 느낀다. 성덕대왕 신종과의 상관성 실험을 통해 음성도 우리 몸에 어떠한 맥놀이가 형성할 수 있음을 확인하였으며, 이 맥놀이가 우리 몸에 어떠한 영향이 있는 지는 좀더 연구가 있어야 하겠다.

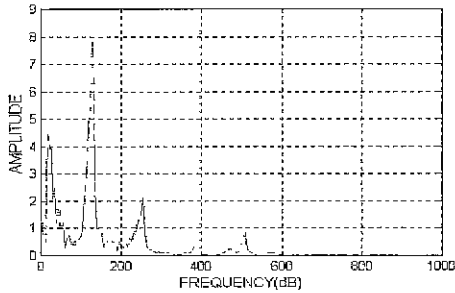
인체는 각 부위별로 고유의 진동수를 갖는다. 인체에 음파가 전달되면서 기본주파수만 남아 인체의 고유 주파수와 더불어 쌍을 이룬다. 이 한 쌍의 주파수가 맥놀이를 형성하며 약 100Hz 안팎의 주파수 차를 갖고 있어서 음의 기본 주파수와 비슷하다. 따라서 인간의 생체 신호의 주기와 음성의 기본 주기 그리고 그



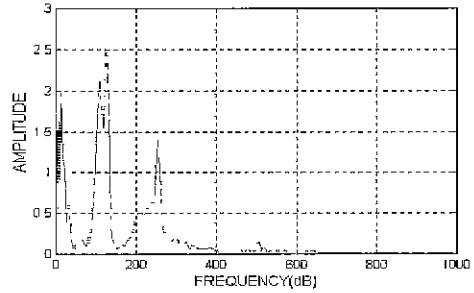
(a) 목



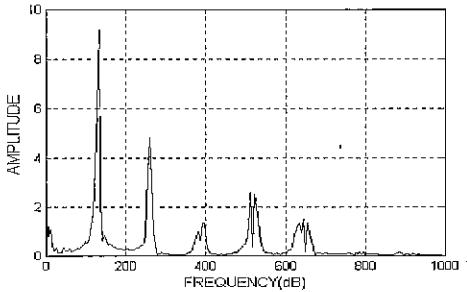
(b) 가슴(상)



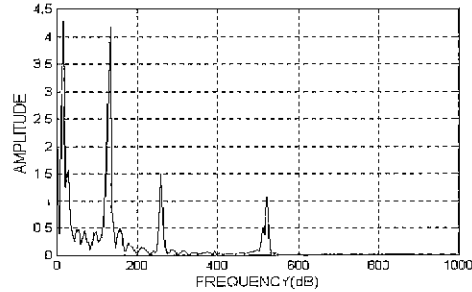
(c) 가슴(중)



(d) 가슴(하)



(e) 복부(상)



(f) 복부(하)

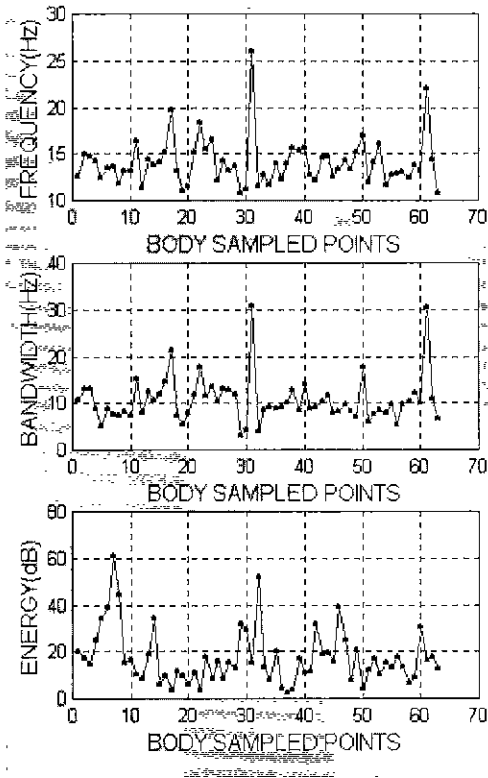
(그림 11) 몸체 진동신호 스펙트럼

사이에서 생성하는 맥놀이 주기가 음의 성질에 어떠한 영향을 주는 지 또는 역으로 발생시 맥놀이 주기가 인체의 생체 주기에 어떠한 영향을 주는 지 차후 계속 연구할 과제이다.

(그림 12)는 인체의 고유 진동수를 중심주파수와 대역폭 그리고 크기로 나타낸 것이다. 주파수가 가장 높게 나타난 곳은 몸통 앞면의 중심부인 심장이었으며, 진동의 크기는 광대뼈근처에서 가장 크게 나타났다.

〈표 1〉 인체 고유진동수 측정위치

측정 위치	인체 부위
1~5	머리 위
6	이마
7, 8	광대뼈
9, 10	귀
11	머리 뒤
12~23	목
24~38	몸통 앞면
39~53	몸통 뒷면
54~58	몸통 우측
59~63	몸통 좌측



(그림 12) 인체 고유 진동수

4. 결 론

인체를 성덕대왕 신종의 연구결과에 비추어, 그 상관성을 실험을 통해 알아보았다. 결과적으로 신종과 인체의 진동은 매우 유사한 특성을 보였으며, 신종의 맥놀이 형성과정과 인체 내부의 피형의 변화가 흡사해 앞으로 인체의 맥놀이 연구에 활용 가치가 크다고 하겠다.

인간이 발성을 할 때 입과 코를 통해서 대부분의 에너지가 방사되지만 우리의 몸을 통해서도 에너지의 일부가 전달되어 각 부분에서 독특한 형태로 나타난다. 이와같은 특징은 음성이 우리 몸의 골격구조와 신체조직과의 관련이 있다는 것을 입증하는 것이다.

즉, 가슴과 복부등에서는 지주와 성분만 남아 몸 밖으로 방사되고, 머리 윗 부분에서는 상대적으로 고주파 성분이 많으며, 미강과 구강이 인접한 얼굴에서는 방사 음성과 매우 근접한 진동 특성이 있었다.

폐로부터 나오는 공기의 압력이 성대를 진동시켜 성도를 통과하면서 음성이 발생하고 이 음파가 인체 밖과 안에 동시에 전파된다. 인체내부에 전달되는 음파는 내부를 지나면서 결국 기본 진동수만 남게되고 이는 생체 신호의 쌍을 이룬다. 생체신호와 음성은 개인별 특성이 다르기 때문에 다양하고 많은 데이터 수집과 통계처리가 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김영수, 진용욱, "과도기 형태 신호의 매개변수 추정기법을 이용한 성덕대왕 신종의 음향분석", 한국음향학회지, Vol.17, NO.7, pp.91-100, 1998.
- [2] 양병곤, "MRI에 의한 모음의 성도 단면적 측정 및 면적 면이에 따른 합성 연구", 음성과학, 제4권 제1호, pp.19-31, 1998.
- [3] 김양한, 김시분, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석", 한국음향학회지, Vol.16, No.4, pp.94-100, 1997.
- [4] 한태동, "世宗代의 音聲學", 연세대학교출판부, 1998.
- [5] 김양한, "음향·진동 측정을 통한 성덕대왕 신종(聖德大王 神鐘, 에밀레종)의 소리 특성 탐구", 한국음향학회지, Vol.16, No.8, 1997.
- [6] 이병국, "인체해부 생리학", 癸丑文化社, 1987.
- [7] 최현, 박해동, 이흥기, 김두훈, "고층 강구조물에서의 비팅(Beating)현상에 의한 특정 구조물의 공진에 대한 분석", 한국소음진동공학회지, 제8권 제4호, 1998.
- [8] 우준규, 정완섭, 김수현, 박윤근, "인체 진동모델의 진동 전달특성에 관한 조사", 한국소음공학회지, 제6권 제5호, pp.625-633, 1996.
- [9] Donnat, P. M. and Bonthoux, C, "Biodynamic Response of the Human Body in the Sitting Position when Subject to Vertical Vibration," Journal of Sound and Vibration, Vol.90, No.3, pp.423-442, 1983.
- [10] 김민수, 최동수, 이영희, 조영진, "수막의 음향특성에 관한 기초연구", 한국농업기계학회, 97년하계학술대회 논문집, Vol.2, No.2, pp.170-177, 1997.
- [11] Ken Robinson, Roy D. Patterson, "The stimulus duration required to identify vowels, their octave, and their pitch chroma," J. Acoustic. Soc. Am., Vol.98, No.4, October, 1995.
- [12] 임상인구심, "음학과 한의학", 한국한의학회, 1998.



전 종 원

e-mail : jwjeon@youngseo.ac.kr

1987년 경희대학교 전자공학과
(학사)

1989년 경희대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)

1996년 경희대학교 대학원 전자
공학과(박사과정수료)

1992년~현재 상지영서대학 전자계산과 부교수

관심분야 : 디지털신호처리, 생체신호처리, 한의정보처리
시스템



진 용 옥

E-mail : yochin@nms.kyunghee.ac.kr

1968년 연세대학교 전기공학과
(학사)

1975년 연세대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)

1981년 연세대학교 대학원 전자
공학과(공학박사)

1975년~1978년 광운공과대학 통신공학과 교수

1979년~1995년 경희대학교 전자공학과 교수

1995년~현재 경희대학교 전파공학과 교수

1998년~현재 경희대 정보통신 창업지원센터 소장

2000년~현재 경희대학교 정보통신대학원 원장

관심분야 : 디지털전송 및 교환기술, 이동통신서비스기술,
한의정보공학, 한글정보공학