

# 인체 내부에서의 진동 전달특성 분석

## An Analysis of the Vibration Characteristics through the Human Body

전 종 원\*, 진 용 옥\*\*

(Jong-Won Jeon\*, Yong-Ohk Chin\*\*)

\*상지영서대학 전자계산과, \*\*경희대학교 전자정보학부

(접수일자: 2000년 8월 4일; 채택일자: 2000년 10월 9일)

본 논문은 음성진단이나 치료를 위한 기초연구로서, 인체의 진동신호를 측정하여 그 특성을 분석한 것이다. 가진신호는 외부적인 힘이 아닌 자신의 음성이며, 진동과 공진 특성이 강한 모음 '아', '에', '이', '오', '우'를 적용하여 실험하였다. 실험 장치로는 마이크로폰과 가속도계 그리고 증폭기를 이용하여 컴퓨터에 측정 데이터를 저장하였다. 마이크로폰으로 음성신호를 저장하면서 동시에 가속도계를 이용하여 인체 각 부위에서의 진동신호를 측정하였으며 측정 위치는 머리, 목, 몸체를 일정한 간격으로 나누어 총 63개의 위치로 정하였다. 진동 신호의 측정 위치와 횟수는 사용 목적에 따라 충분히 가변적일 수 있다. 진동 분석을 위한 파라미터는 진동 신호의 크기, 위상, 기본 진동수, 결집음폭대이며, 코히어런스 함수를 이용하여 인체의 진동신호와 음성과의 상관성을 알아보았다. 실험결과, 인체의 위치에 따라 독특한 특징들이 있음을 확인하였으며, 그 결과를 제시하였다.

**핵심용어:** 인체, 진동특성, 위상특성, 옥타브 밴드

**투고분야:** 음성처리 분야, 구조음향 및 진동 분야

This paper describes the analysis of vibration characteristics through the human body as the research for voice therapy and diagnosis. The oscillation signal is not external forces but the self-voice to be pronounced the vowels ('a', 'e', 'i', 'o', 'u'). The experiment system consists of microphones, accelerometers and amplifiers. The input data are stored by the computer. At the same time, the voice is stored by the microphone and the vibration signal of the human body is stored by accelerometer. The 63 points are appointed in head, neck, trunk of human body. The positions and number of times are changeable by the purpose. The analysis parameters are amplitude, phase, fundamental frequency, formant and the correlation of vibration signal and voice is measured by coherence function. The results show that the vibration signals have characteristic vibration in the positions of human body.

**Key words:** Human body, Vibration characteristics, Phase characteristics, Octave band

**Subject classification:** Speech signal processing, Structural acoustics and vibration

### I. 서 론

인체에 있어서 진동은 크게 두 가지 형태로 연구되어 왔다. 하나는 외부 진동이 인체에 어떤 영향을 미치는 가 하는 것이고<sup>[1,2]</sup> 다른 하나는 인체에서 발생하는 진동신호로부터 원하는 정보를 얻는 일이다<sup>[5,7,12]</sup>. 외부의 진동은 진동수에 따라 말이나 피로, 기타 건강에 해를 끼치기도 하지만 치료효과와 같은 도움을 주기도 한다. 과거 음성에 의한 진단은 주로 인간의 발성기관을 대상으로 하였으며 최근에는 음성치료(Sound Healing)에 관한 연구가 활발하다<sup>[12]</sup>. 마찬가지로 생체 음향분야에서도 생물의 작용을 촉진 또는 저하 시키기 위해 음파를 적용하며, 그밖

에 진동신호를 이용하여 구조물의 특성과 내부의 상태를 비파괴적으로 평가하기도 한다<sup>[1,3]</sup>.

또한 의사는 인체내의 진동음을 청진기를 이용하여 들으며, 심장의 소리, 폐 속의 공기의 출입이나 저류액의 유무를 판단한다. 그러나 인간은 진동현상이 개인에 따라 다르고 심리적인 요소가 작용하여 그 반응이 다르기 때문에 통계적 방법의 도입이 필요하다.

본 논문에서는 모음 '아', '에', '이', '오', '우'를 발생하여 그 진동신호가 인체 각 부위에 전달되는 과정과 특성을 분석하였다. 첫째, 인체에 전달되는 에너지의 변화를 주파수별로 살펴보았으며 주파수별 비교분석을 용이하게 하기 위하여 8옥타브(Octave) 대역으로 나누어 분석하였다. 둘째, 상대에서의 신호의 변화와 역할 등을 실험을 통해 알아보았고 셋째, 음성 고유의 특성이 인체의 각 부위에서 어떤 특성으로 나타나는 지 알아보기 위해 결집

책임저자: 전종원 (jwjeon@youngseo.ac.kr)  
220-713 강원도 원주시 우산동 660 상지영서대학교 전자계산과  
(전화: 033-730-0778; 팩스: 033-730-0761)

음폭대(Formant)와 코히어런스(Coherence)를 측정하였다.

### II. 실험장치 및 방법

#### 2.1. 데이터 입력 시스템

음성에 관한 인체 각 부위의 진동 신호를 검출하기 위해 모음 '아','에','이','오','우'를 발성하도록 하여 그 음성과 함께 인체 각 부위에 전달되는 진동 신호를 동시에 측정하였다. 모음이 자음보다 많은 진동을 발생시키며 공진특성이 잘 나타나기 때문에 실험 음성으로 사용하였다.

인체 진동신호 추출을 위한 측정위치는 먼저 인체를 그림 1과 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 각각 15곳, 양측면은 중방향으로 5곳을 표본 추출 구간으로 설정하여 전체 63개의 위치를 설정하였다. 음성신호는 진동원으로서의 역할과 더불어 인체 내부 진동신호를 분석하기 위한 기준 신호로 사용하기 위해 동시에 저장하였다. 데이터 입력 장치로는 마이크로폰(B&K4193)과 가속도계(B&K4374)를 사용하였으며 증폭기는 NEXUS(B&K2690)를 사용하였다(그림 2).

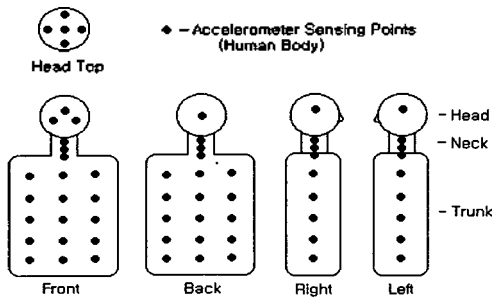


그림 1. 가속도계 측정 위치  
Fig. 1. Accelerometer sensing points.

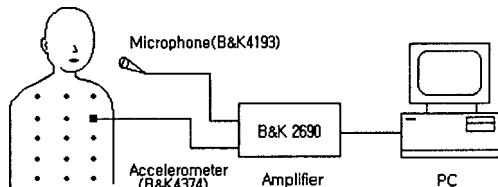


그림 2. 인체 진동신호 측정 시스템  
Fig. 2. The System to measure the human vibration.

표 1. 마이크로폰 규격  
Table 1. Microphone Specifications.

| B&K 4193             |                  |
|----------------------|------------------|
| Sensitivity:         | 12.5mV/Pa        |
| Polarization voltage | 200V             |
| Frequency range      | 0.07Hz to 20kHz  |
| Dynamic range        | 20.7dBA to 161dB |

표 2. 가속도계 규격  
Table 2. Accelerometer Specifications.

| BK &4374                    |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| sensitivity                 | 1.1 pC/g          |
| Frequency range             | 1Hz to 26kHz(10%) |
| Mounted resonance frequency | 85kHz             |
| Weight                      | 0.65gram          |

### III. 인체의 진동 특성

#### 3.1. 에너지 분포 특성

주파수별 비교분석을 용이하게 하기 위하여 옥타브 대역으로 나누어 분석하였다. 중심 주파수(Characteristic Frequency)는 일정 주파수 대역의 중간주파수를 의미하거나, 옥타브 대역 해석시 기준이 되는 주파수이다. 옥타브 대역의 상, 하한 주파수를 각각  $f_1$  및  $f_2$ 이라 하고, 중심주파수를  $f_0$ 라 하면,

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}, f_2 = 2^a f_1 \quad (1)$$

와 같은 관계를 갖는다. 여기서  $a$ 는 옥타브 대역에 따른 상수로 1, 1/3, 1/12 등의 값을 갖는다. 본 논문에서는 ISO가 규정한 옥타브 밴드 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000(Hz)를 사용하였다. 실험한 결과 몸통(Trunk)에서는 위로 갈수록 에너지가 높게 나타났으며 배(Belly)로 갈수록 에너지 값이 감소하였다. 또한 우측이 좌측보다 에너지가 높았다. 결과적으로 흉강이 복강보다 큰 공명강이라는 사실과 우폐가 좌폐보다 크게 진동한다는 것을 알 수 있었는데, 인체 해부학적으로 볼 때 우폐는 625g이고, 좌폐는 약 567g 정도로 우폐가 약간 크고 무겁다[9]. 그림 3은 몸통에서의 에너지를 등고선도로 나타낸 것이다.

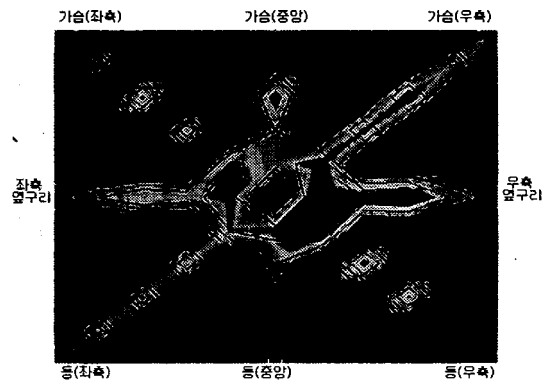


그림 3. 음파진동 에너지분포(모음 '아' 경우)  
Fig. 3. The distribution of vibration energy(vowel 'a').

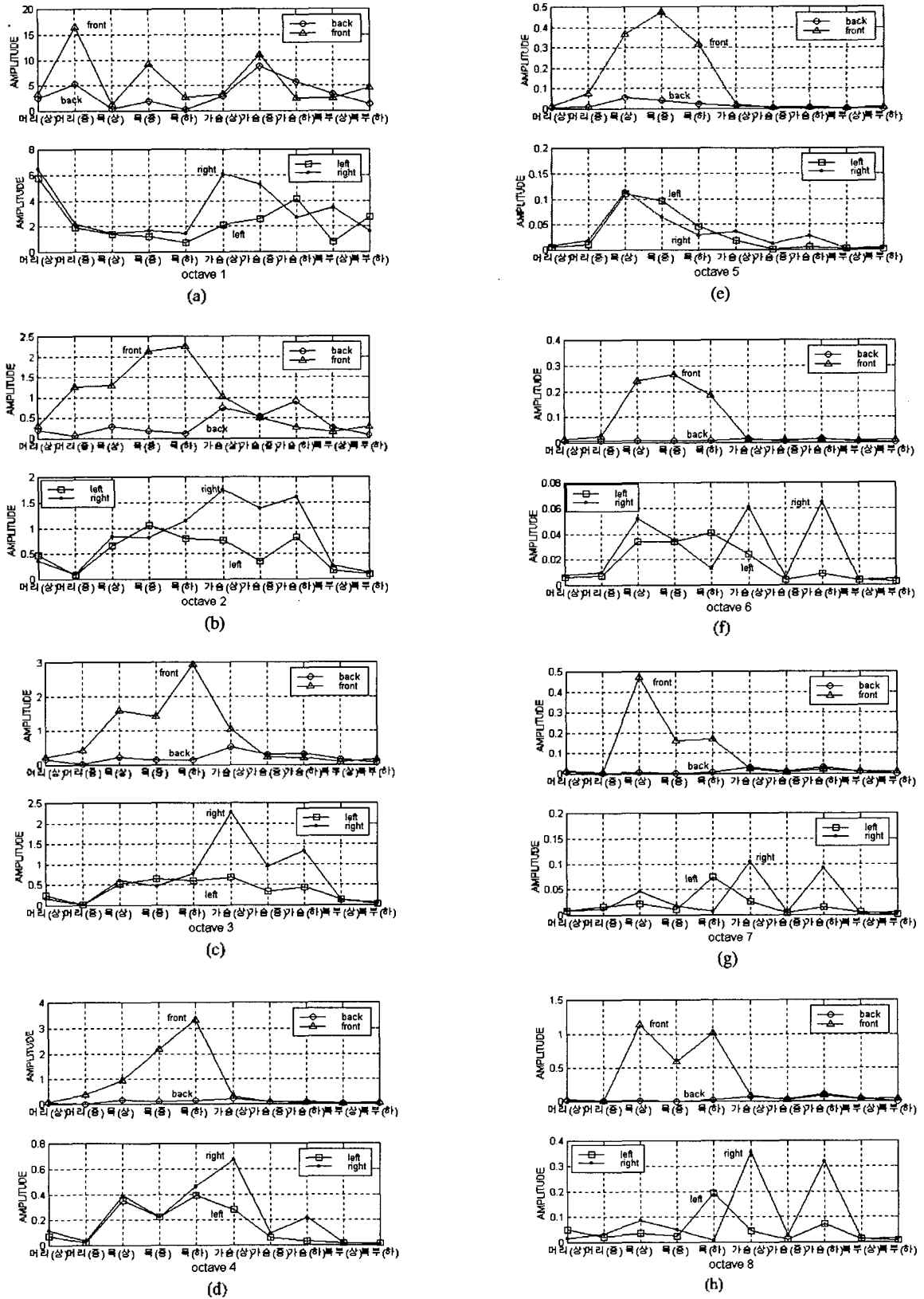


그림 4. 옥타브 대역에 따른 진동 에너지 특성  
 Fig. 4. The characteristics of vibration energy by octave band.

그림 4에서와 같이 옥타브 1대역에서는 일괄, 성대, 가슴 가운데와 등 가운데 위치에서 에너지가 높게 나타났다. 인체의 좌,우 측면에서 살펴보면 머리와 우측 가슴 위, 왼쪽 가슴 아래 부분이 높게 나타난다.

옥타브 2대역에서는 목 앞 부분과 우측 가슴에서 에너지가 높고 머리 부분과 복부에서는 상대적으로 매우 낮았으며 옥타브 3,4대역에서는 성대 아래 부분과 우측 가슴 위에서 높은 에너지 값이 나왔다. 옥타브 5대역에서는 목 뒷 부분과 목의 좌,우측에서 높은 에너지가 나타났고, 옥타브 6대역에서는 목과 가슴 상단, 하단에서 높은 에너지가 나타났다. 옥타브 7대역에서는 인체 앞 부분중 목 부위, 좌, 우 측면에서는 가슴 부위에서 높은 에너지 값이 나왔다. 옥타브 8대역은 옥타브 7대역에서와 유사한 결과가 나왔다.

인체에 대한 진동 에너지 분포를 정리하면 성대 부위에서는 주파수 대역이 어느정도 올라 가면서 성대 아래보다 성대 윗 방향(머리)으로 에너지 방사가 크다는 사실을 확인하였고, 가슴과 복부에서는 가슴에서부터 복부 아래 방향으로 내려갈수록 에너지가 감소하는 경향을 보였다. 특이한 점은 가슴의 상단의 에너지가 상대적으로 높았다. 이것은 파형중첩의 원리와 일치하는 결과로 성대와 횡격막이 마주보는 두 개의 벽에 해당하는 역할을 한다고 볼 수 있으며 가슴 상단은 그 중앙에 위치한다고 볼 수 있다.

성대 부위를 제외하고는 우측 가슴 뒷 부분에서 가장 큰 에너지 방사가 나타났다. 머리위에서 발생하는 평균 에너지와 가슴부위의 평균 에너지를 비교한 결과 그림 5와 같다. 가슴 부위에서의 평균 에너지는 발음에 관계없이 유사한 에너지 방사값이 검출되었으나 머리부분에서는 모음 '아'와 '에'를 발생할 때 가장 낮은 값이 나왔고 모음 '이'에서는 가슴보다 머리에서 더 많은 에너지가 검출되었다.

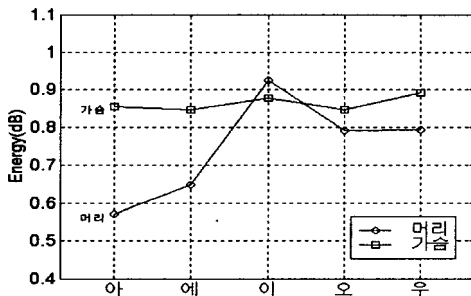


그림 5. 머리와 가슴 부위의 에너지 비교  
Fig. 5. comparison between head and chest energy.

3.2. 성대의 진동특성

인체는 두 개의 울림판이 존재한다. 한 개는 목에 있는 성대(vocal cords)이며, 한 개는 몸 중앙에 위치한 횡

격막(diaphragm)이다. 이 중에서 성대의 상,하 양측면에 인접한 두 진동신호를 비교해 보았다. 위상은 역전(Phase Reversal)되어 180° 가까이 위상차가 발생한다. 마치 신호를 뒤집어 놓은 것과 같은 모양이 성대 위와 성대 아래에서 나타났다. 그림 6은 성대 위와 아래의 진동신호이고 그림 8은 두 신호의 상호상관함수(cross correlation)의 위상 성분을 히스토그램(histogram)으로 표현한 것이다. 상호상관함수의 위상성분은 다음 식과 같이 계산하였다.

$$G_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt \right] e^{-2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

$$G_{xy}(f) = X(f) Y^*(f) \quad (3)$$

$$\phi_{xy}(f) = \tan^{-1} \left( \frac{Im(G_{xy}(f))}{Re(G_{xy}(f))} \right) \quad (4)$$

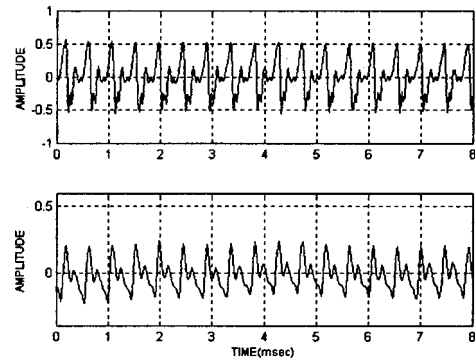


그림 6. 목의 상·하 진동신호  
Fig. 6. The vibration signal in upper and lower neck.

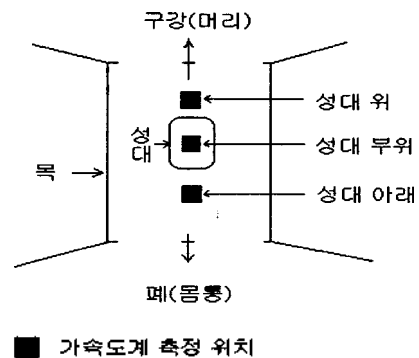


그림 7. 목의 진동신호 측정 위치  
Fig. 7. The position measured the vibration signal in the neck.

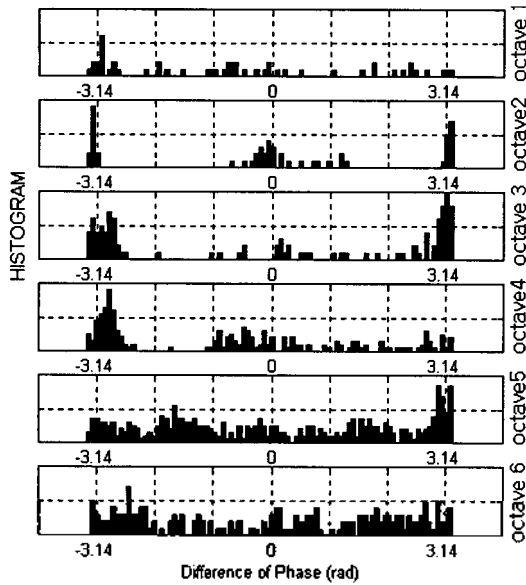


그림 8. 목의 상·하 진동신호의 상호스펙트럼 위상분포 (Histogram)  
 Fig. 8. The histogram of cross spectrum phase of the vibration signal in the neck.

3.3. 인체 내부 진동신호의 위상 특성

기본 진동수(pitch)에 대한 상호스펙트럼(cross-spectrum) 위상을 각각의 위치에 따라 계산한 결과 그림 9와 같은 결과를 보였다. 그림에서 있는 바와 같이 안면(face)과 가슴(chest) 상단에서는 음성에 근사한 위상을 가졌고, 복부와 머리 뒷면 등에서는 음성과 역위상으로 나타났다. 또한, 성대를 기준으로 목 윗부분과 아랫 부분 그리고 가슴 아래와 복부 윗 부분 역시 역위상을 갖는다는 것을 기본 진동수를 사용하여 다시 한번 확인할 수 있었다. 모음 '이'를 제외하고는 가슴 부위의 위상차가 가장 작았다.

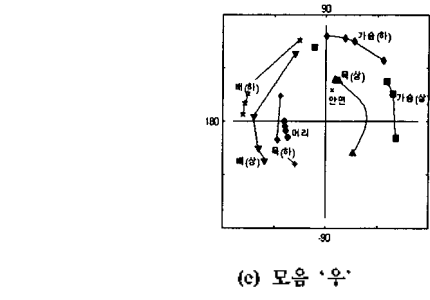
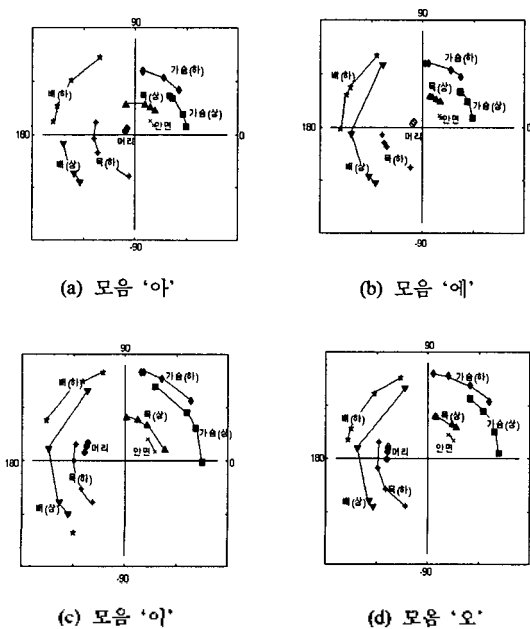


그림 9. 음성과 진동신호의 상호스펙트럼 위상(기본진동수의 경우)  
 Fig. 9. The cross-spectrum phase of voice and vibration signal(fundamental frequency).

3.4. 결집음폭대(Formant) 분석

인체의 공명특성을 알아보기 위해 결집음폭대 성분을 추출하여 비교하였다. 제1결집음폭대는 가슴-머리-목 순으로 높았으며 모음 '아'에서는 가슴과 복부, 머리에서 제2결집음폭대 주파수가 음성과 일치하였다. 모음 '우'에서는 광대뼈(cheekbone)에서 음성과 결집음폭대 1,2주파수가 거의 일치하였으며, 귀에서의 제2결집음폭대는 음성과 가장 일치하였다.

음성(voice)과 인체 진동에 대한 결집음폭대(formant)에서 모음에 따라 몇 가지 특징들을 찾아볼 수 있었다. 첫째, 귀 위쪽(머리 양측)에서의 진동은 음성 모음 '아', '오', '우'에서의 제1결집음폭대성분과 제2결집음폭대 성분과 모두 일치 하였다. 이것을 모음 발성에 대한 성도 단면적의 변화 형태<sup>[5]</sup>에 비추어 살펴보면 모음 '아', '오', '우'를 발성할 때는 구강의 단면적이 다른 모음에 비해 아주 크다. 둘째, 모음 '아'에서는 머리 위와 몸통에서 제 2결집음폭대 성분이 일치하였는데, 모음 '아'를 발성할 때 성도 단면적은 성문과 인강의 단면적이 아주 작다. 셋째, 모음 '오'와 '우'에서는 광대뼈에서 제2결집음폭대 성분이 일치하였다. 이 때 성도 단면적은 구강은 넓고 성도의 종단인 입술은 좁히는 형상이 된다. 이와같이 성도의 단면적은 밖으로 방사되는 음성(voice)뿐만 아니라 인체내의 진동에 영향을 주며, 인체의 위치에 따라서 나타나는 특징이 서로 다르다는 것을 확인할 수 있었다.

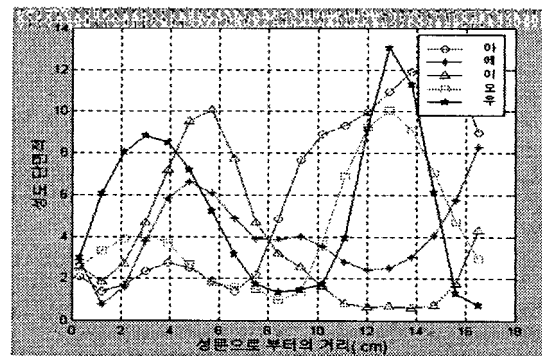


그림 10. 성도의 단면적<sup>[5]</sup>  
 Fig. 10. The section area of vocal tract<sup>[5]</sup>.

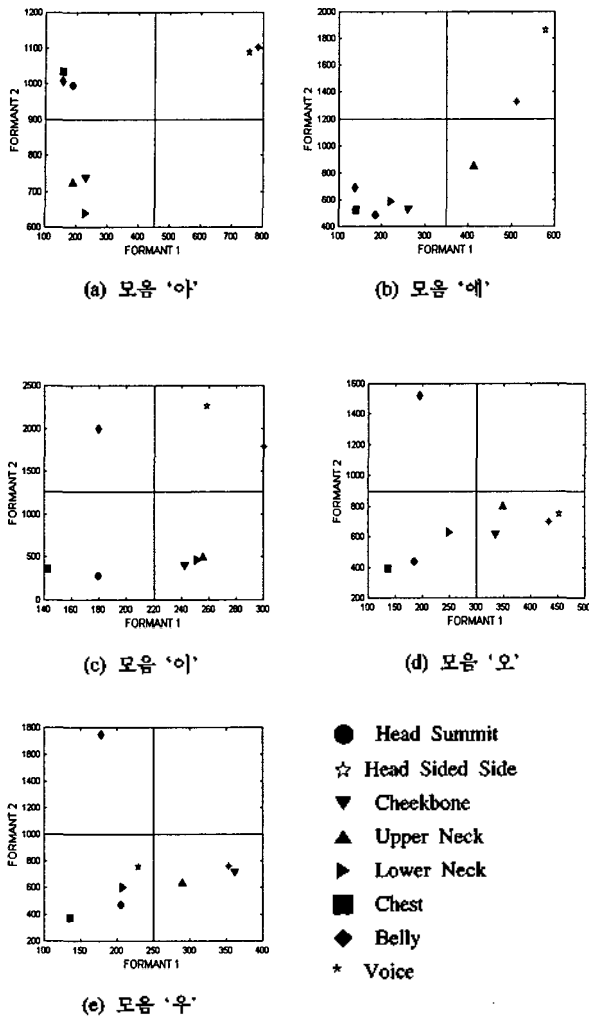


그림 11. 신체 부위별 결집음폭대  
Fig. 11. Formant of human body.

결집음폭대 분석을 위해 프레임 길이(Frame Length)는 10msec, 프레임 이동(Frame Advance) 5msec, 필터 계수(Filter Order)는 12차, 대역폭(Band Width)은 500Hz이하로 제한하여 계산하였다.

3.5. 코히어런스 특성

음성신호와 내부 음파 사이의 유사도를 측정하기 위해 코히어런스(coherence) 함수를 사용하였다. 코히어런스 함수는 두 신호 사이의 선형성의 정도를 나타내는 지표로서 주파수의 함수로 표현하며 두 신호의 자기스펙트럼(Auto-Spectrum)과 상호스펙트럼(Cross-Spectrum)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{12}(f)|^2}{G_{11}(f) \cdot G_{22}(f)} \quad (5)$$

여기서 아래첨자 1, 2는 각각 신호 1, 2를 의미하는 것으로 음성과 진동신호이다. 코히어런스 함수값은 0~1

사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 두 신호 사이의 선형 종속 정도가 강하다고 볼 수 있다. 인체에서 63개의 표본 위치를 정하고 각 위치에서의 내부 진동신호와 음성을 가지고 코히어런스 함수를 구하였다. 그림 12는 주파수 대역을 8옥타브로 나누어 인체 부위와 함께 구성된 3차원 특징을 등고선도로 나타낸 것이다.

코히어런스 등고선도에 나타난 결과에 의하면 모음 '아'를 기준으로 볼 때 가슴위치에서는 옥타브 4, 5대역에서 음성과 높은 일치도를 보였고, 복부위치에서는 옥타브 3, 4대역에서, 목에서는 옥타브 3, 4, 5, 6대역에서, 귀에서는 옥타브 5대역에서, 광대뼈 위치에서는 비교적 전구간에 걸쳐 다른 부위에 비해 높았다. 머리에서는 옥타브 4, 5대역에서 높았다.

모음 '에'에서는 가슴 부위중에서 옥타브 5와 6주파수 대역에서 높고, 모음 '이'에서는 옥타브 3, 4대역에서 코히어런스 값이 높았다.

'오', '우'는 유사하며, 복부를 제외하고 옥타브 3, 4, 5대역에서 고르게 일치하였다. 모든 모음에서 저주파 대역에서의 코히어런스가 고주파 대역보다 상대적으로 높게 나타났으며 등에서 가장 차이가 많았다. 그림 13은 고주파 대역과 저주파 대역의 코히어런스(Coherence) 특징이다.

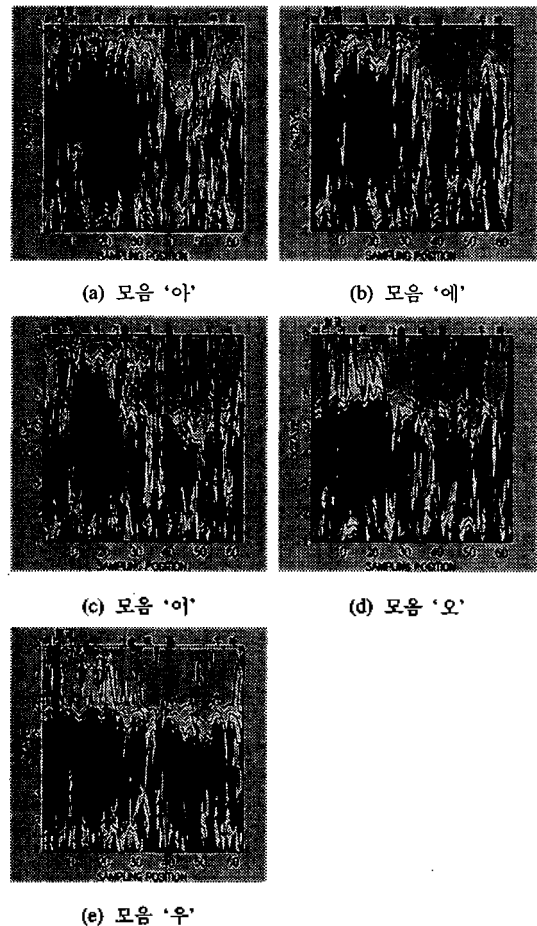


그림 12. 음성과 진동신호의 코히어런스 분포  
Fig. 12. Coherence of voice and vibration signal.

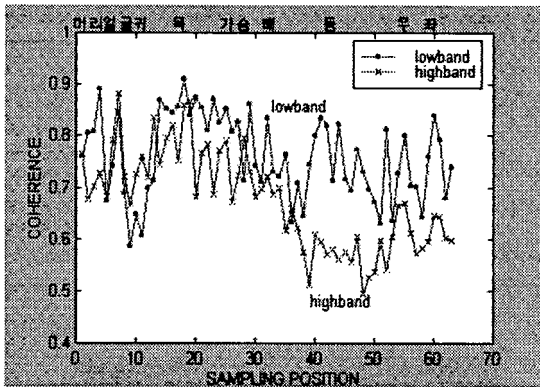


그림 13. 고주파와 저주파 대역의 코히어런스  
Fig. 13. Coherence of highband and lowband.

#### IV. 결 론

인간이 발성을 할 때 입과 코를 통해서 대부분의 에너지가 방사되지만 우리의 몸을 통해서도 에너지의 일부가 전달되어 각 부분에서 독특한 에너지의 형태로 나타난다. 이와같은 특징은 우리 몸의 골격구조와 신체조직과 관련이 있다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 가슴과 복부등에서는 저주파 성분만 남아 몸 밖으로 방사되며, 머리 부분에서는 상대적으로 고주파 성분이 많이 나타났다. 특히 비강과 구강이 인접한 부위에서는 방사 음성과 매우 근접한 진동 특성이 있었으며 오른쪽 가슴에서의 진동은 왼쪽보다 크게 나타났다.

인체는 대칭이면서 내부적으로 좌,우가 다르고 횡격막과 성대를 기준으로 부분적으로 상,하가 구분되어 있다. 이와같은 구조적 특성에 대한 음파의 전달특성을 전달에너지와 위상성분,결집음폭대 특성,방사 음성과의 상관성을 통해 알아보았다. 향후, 인체 내부의 음향 특성을 이용하여 더욱 효과적인 음성치료나 음성진단을 하기 위해서는 다양한 기초 연구가 필요하다고 하겠다.

#### 참 고 문 헌

1. 최현, 박해동, 이흥기, 김두훈, "고층 강구조물에서의 비팅(Beating)현상에 의한 특정 구조물의 공진에 대한 분석," 한국소음진동공학회지, 제8권 제4호, 1998.
2. 우춘규, 정완섭, 김수현, 박윤근, "인체 진동모델의 진동 전달특성에 관한 조사," 한국소음공학회지, 제6권 제5호, pp. 625-633, 1996.
3. 김만수, 최동수, 이영희, 조영길, "수박의 음향특성에 관한 기초연구," 한국농업기계학회, 97년하계학술대회논문집, Vol. 2, No. 2, pp. 170-177, 1997.
4. 김영수, 진용옥, "파도기 형태 신호의 매개변수 추정기법을 이용한 성덕대왕 신종의 음향분석," 한국음향학회지, Vol. 17, NO. 7, pp. 91-100, 1998.
5. 양병곤, "MRI에 의한 모음의 성도 단면적 측정 및 면적 변이에 따른 합성 연구," 음성과학 제4권 1호, pp. 19-34, 1998.

6. 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석," 한국음향학회지, vol. 16, no. 4, pp. 94-100, 1997.
7. 한태동, "世宗代의 音聲學," 연세대학교출판부, 1998.
8. 김양한, "음향·진동 측정을 통한 성덕대왕 신종(聖德大王神鐘, 에밀레종)의 소리 특성 탐구," 한국음향학회지, Vol. 16, No. 8, 1997.
9. 이병국, "인체해부 생리학," 兪井文化社, 1987.
10. Donati, 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.
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. 임상연구실, "음악과 한의학," 한국한의학연구원, 1998.

#### ▲ 진 종 원(Jong-Won Jeon)



1987년: 경희대학교 전자공학과(학사)  
1989년: 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
1996년: 경희대학교 대학원 전자공학과(박사과정수료)  
1992년~현재: 상지영서대학 전자계산과 부교수

※ 주관심분야: 디지털신호처리, 생체신호처리, 한의정보처리시스템

#### ▲ 진 용 옥(Yong-Ohk Chin)



1968년: 연세대학교 전기공학과(학사)  
1975년: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
1981년: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
1975년~1978년: 팽문공과대학 통신공학과 교수

1979년~1995년: 경희대학교 전자공학과 교수

1995년~현재: 경희대학교 전파공학과 교수

1996년~현재: 한국음향학회 명예회장

1998년~현재: 경희대 정보통신 창업지원센터 소장

2000년~현재: 경희대학교 정보통신대학원 원장

※ 주관심분야: 디지털전송 및 교환기술, 이동통신서비스 기술, 한의정보공학, 한글정보공학 등