Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 22, No. 2 (2013) pp. 156-161
http://dx.doi.org/10.5369/JSST.2013.22.2.156
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

성문전도를 이용한 발성훈련 시스템

이제현 · 김지혜 · 강구태 · 정동근+

Vocal Exercise System Using Electroglottography

Lee Je-Hyun, Kim Ji-Hye, Kang Gu-Tae, and Jung Dong-Keun+

Abstract

This study was aimed to implement the electroglottography (EGG) system for analyzing fundamental frequency of the phonation. EGG was recorded from the conductance between ring electrodes attached to the neck skin area near thyroid cartilage with high frequency carrier electric signals during vocalization, and voice signal was recorded with microphone simultaneously. EGG and voice signals were transmitted to the audio port in PC and recorded with stereo sound recording program. From the digitized data, several parameters such as pitch, jitter, shimmer, CQ and SQ were analyzed from the vowel sounds. For the voice training, sound fundamental frequency was displayed during the vocalization and singing a song using pitches analyzed from the EGG. The system implemented in this study could be used for vocal exercise.

Keywords : Electroglottography, EGG, Sound fundamental frequency, Vocal exercise, Vowel sound

1. 서 론

말소리(voice)는 성대의 진동에 의하여 발성된 후두원음(buzzing sound)이 하인두로부터 입술까지의 성도(vocal tract)와 비강에 의한 공명과정(resonance), 조음기관에 의한 조음과정(articulation)을 거쳐 만들어진다. 성대의 발성기전으로는 공기역학과 후두조직의 근탄성도(myoelasticity)의 조화에 의한 공기역학설(aerodynamic theory)이 정설로 인정되고 있다[1]. 발성하는 동안 양측 성대의 주기적인 개폐작용으로 폐에서 성문으로 유입되는 공기의 흐름이 맥동성으로 변환되며 이는 유성음 발성에서 성대음의 기본주파수(fundamental frequency : Fo)를 구성한다[2].

젊은 성인이 편안한 높이와 크기로 모음을 발성하는 경우 성대음의 기본주파수는 남자의 경우 약 100-150 Hz, 여자의 경우 약 200-300 Hz이다. 일반적으로 여성이나 어린이의 음성은 주파수가 높고, 남성의 음성은 주파수가 낮다. 각 개인이 낼 수 있는 최고음과 최저음의 범위, 즉 성역(register)은 정상 성인의 경우 약 2옥타브이다. 사춘기가 되면 남성의 말소리가 갑자기 1옥타브 낮아지는데, 이 시기를 변성기(break voice)라 한다. 일상회화에 사용되는 말소리의 높이인 음도(pitch)는 개인이 낼 수 있는 가장 낮은 음도보다 조금 높은 곳에 있다. 사람이 낼 수 있는 말소리의 범위는 대략 80-1,280 Hz의 4옥타브이다[3].

성대의 진동을 검사하는 방법으로 직접 성대를 관찰하는 방법에는 후두스트로보스코프[4], 카이모그라프[5], 초고속후두촬영[6] 등이 있으며 성대의 진동 만을 검출하는 비침습적인 방법으로는 성문도검사(glottography)가 있다. 비침습적인 성문도검사 방법으로 전기성문도검사(EGG)[7], 초음파성문도검사[8], 성문광전도검사[9] 등이 보고되어 있다. 현재 임상과 연구에 가장 많이 사용되는 방법은 전기성문도검사이다.

EGG는 성대의 진동에 따른 생체조직의 전기 임피던스 변화를 기록한 것이다[10]. EGG 기록 장치는 1957년 Fabre가 처음 고안하였으며[7], 1968년 Frokjaer-Jensen과 Fourcin 등이 개량하여 상품화시켰다. EGG는 갑상연골 외측 경부의 피부에 부착시킨 전극을 통하여 생체조직의 전기 임피던스를 그래프로 나타내는 것으로 성대가 열려있을 때는 전류 통로가 작아져 전기저항이 커지고, 성대가 닫히면 전류 통로가 커져서 전기저항이 작아진다[11]. 유성음 발성시에 성대의 수동적인 개폐운동에 의한 특징적인 진동파형(vibratory cycle)은 순차적인 과정으로 진행된다. 성대의 하순(lower lip)이 먼저 닫히고 그 후에 상순(upper lip)이 닫히며, 일정시간의 폐쇄기(closed phase)가 있은 후, 성문하 호기압이 증가됨에 따라 성대 하순이 열리고 성대 상순이 열리면서 개방기(open

동아대학교 의과대학 의공학교실(Dept. of Medical Engineering, College of Medicine, Dong-A University)
3Ga-1, Dongdaesin-dong, Seo-gu, Busan 602-714, Korea
+Corresponding author: dkjung@dau.ac.kr
(Received : Feb. 18, 2013, Accepted : Mar. 26, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

phase)로 이행되는 진동파형을 이룬다[12]. EGG의 장점은 성대운동을 관찰하는 비침습적인 방법이며, 조음과정에 방해를 주지 않고, 연속 구어로부터 데이터를 얻기 쉽다. 또한 파형으로부터 기본주파수와 주파수변동률을 결정하기 쉬우며 이를 통해 음성질환에 대한 진단 및 예후판정 등에 이용되고 있다[3].

본 연구의 목적은 주변 환경의 소음에 의한 간섭 없이 발성 기본주파수를 측정할 수 있는 소형화된 EGG를 구현하고 PC로 직접 연결하여 성대 운동성을 평가하는 분석도구를 개발하여 음성훈련에 활용 가능한 시스템을 구현하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 EGG 기록장치 구성

EGG 측정을 위한 신호증폭기 구성은 Fig. 1과 같다. 고주파수 저진폭 전압원을 갑상연골 양쪽의 목 부위 피부에 가하고 독립적인 두 지점의 피부 전극에서 검출되는 전기신호를 기록하여 발성 시에 성대진동에 의한 전기적 임피던스 차이에 따라 진폭변조(amplitude modulation) 검출 방식으로 복조하여 필터링과 증폭을 거쳐 성대 진동에 대한 신호를 얻었다.

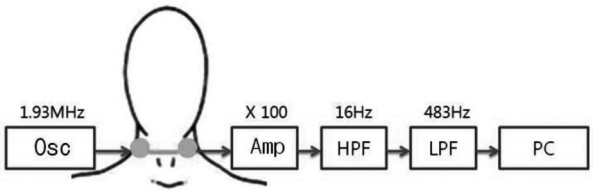

Fig. 1. Block diagram of the EGG measurement. Osc, oscillator; Amp, amplifier; HPF, high pass filter; LPF, low pass filter; PC, personal computer.

하드웨어 본체에 EGG 기록을 위한 전극, 음성기록을 위한 마이크가 연결되도록 구성하였다. EGG 기록을 위한 측정기는 실험실에서 제작하였다(Fig. 2). 본체 크기는 6.5×5×2 cm이며 구성은 발진부, 증폭부, 필터부로 회로가 구성되어 있다. -3.3~+3.3 V로 구동되며 검출된 신호는 PC 마이크 입력단에 연결된다. 전원은 리튬폴리머전지를 사용하는 충전식이다.

EGG 기록을 위한 전극은 가드 링 전극(guard ring electrode)을 사용하였다(Fig. 2). 동심원으로 구성된 전극면을 가지며 표면은 금으로 코팅되어 있다. 갑상연골 양측의 바깥쪽 원이 전압원을 가하는 전극이며 가운데 원이 신호검출용 전극이다. 전극을 본체와 연결하는 전선은 전압원 연결선이 검출선을 에워싸도록 하여 주변 잡음을 차폐시키도록 하였다.

음성 기록은 핀마이크를 사용하였으며 EGG와 음성신호는 PC의 스테레오 오디오 입력포트에 연결하여 신호를 기록하였다.

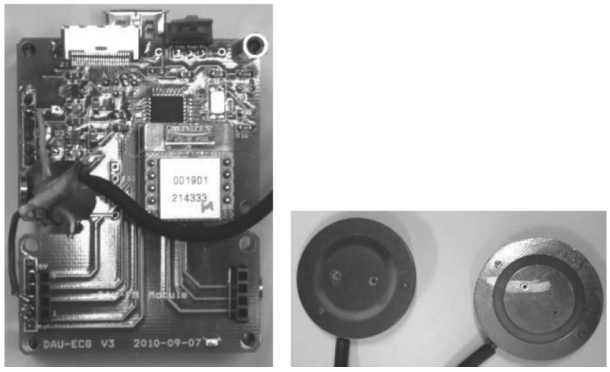

Fig. 2. EGG amplifier and electrodes.

2.2 EGG 기록장치 구성

갑상연골이 위치하는 목 부위 피부에 이물질을 제거 후 한 쌍의 전극을 목 부위 피부에 부착하고 탄력밴드로 고정한다. 입 근처에 마이크를 위치시킨 후 피검자는 편안한 상태로 의자에 앉아서 모음을 발성한다. PC에서 Adobe Soundbooth CS4 (Adobe, USA)를 실행시키고 샘플링율은 48,000 Hz, 분해능을 32 bit로 설정하였다. 시험적인 발성을 통하여 전극의 부착 여부 및 EGG와 음성 파형이 적절한 크기로 기록되는지를 먼저 확인하였다. 편안하고 안정된 음성 샘플링을 위하여 데이터 수집 전 충분히 발성 연습하였다. 이후 각각의 모음을 편안하게 10초간 발성한다. 수집된 자료에서 안정적인 부분의 2초 구간을 선택하여 MatLab version R2009a (MathWorks, USA)으로 분석하였다.

2.3 EGG 신호처리

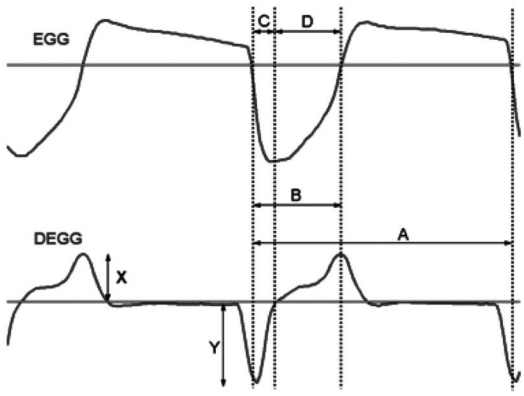

Fig. 3. Raw and differentiated waveforms of EGG. Vertical dotted lines are characteristic time points for the period, open and close of vocal cord vibration. DEGG, differentiated EGG; A, duration of vibration cycle; B, duration of closed phase; C, duration of increasing glottal contact area; D, duration of decreasing glottal contact area.

성대진동에 따른 주기성 파형인 EGG의 파라미터를 분석하기 위하여 원신호 및 미분신호를 기반으로 신호처리를 수행하였다(Fig. 3). EGG 신호는 생체조직의 전기적 전도성에 대한 기록이며 위쪽이 성대가 열려있는 구간이며 아래쪽이 성대가 닫혀있는 구간이다. 상승구간은 성대가 열리는 과정이며 하강구간이 성대가 닫히는 과정이다. 원신호의 제로 크로싱을 검출하고 미분신호에서는 최대점과 최소점 그리고 제로 크로싱을 각각 검출하였다. 이를 기반으로 pitch, CQ, SQ, jitter, shimmer 등을 분석하였다.

2.3.1 Pitch (Fo) 분석

Pitch는 EGG 신호의 매주기에서 시간 간격을 나타내는 것으로 기본주파수에 해당하며, 발성 시에 음정의 기준이 된다. EGG신호의 매 주기에서 미분신호의 최저점을 이용하여 검출한다. 인접하는 미분신호 최저점의 시간 간격을 측정하여 주기 To 및 기본주파수 Fo(1/To)를 매 주기에 대하여 분석한다.

$$\text{Pitch(Fo)} = \frac{1}{A} \tag{1}$$

2.3.2 Closed Quotient (CQ)

CQ는 패쇄시간률이라 하며 성대진동의 1주기 내, 성대가 닫혀있는 시간 비율이다. 식(2)로 계산되며 정상에서는 40_60%이며 남녀 사이에는 별 차이가 없는 것으로 알려져 있다[13].

$$CQ = \frac{B}{A} \times 100 \tag{2}$$

2.3.3 Speed Quotient (SQ)

SQ는 성대접촉속도률이라 하며 폐소기의 시간에 대한 개대기의 시간 비율이다. 식(3)으로 계산되며 정상치는 남자에서 약 265%, 여자에서 228%이다.

$$SQ = \frac{D}{C} \times 100 \tag{3}$$

2.3.4 주파수 변동률(Jitter)

주파수 변동률(jitter)은 식(4)와 같이 계산하며, 주어진 시간 구간에서 이웃한 피치의 기본 주기(To)의 차이의 절대치를 전체 피치의 기본 주기의 평균으로 나눈 백분율로 구하며 피치의 변화율을 뜻한다. 임상에서는 1.04% 이하일 때 정상적인 음성으로 평가한다[14].

$$\text{Jitter}(\%) = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=0}^{N-1}|To - To(i+1)|}{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} To(i)} \times 100 \tag{4}$$

2.3.5 진폭 변동률(Shimmer)

진폭 변동률(shimmer)는 식(5)와 같이 계산하며, 주어진 구간에서 이웃한 주기 진폭(Po) 차이의 절대치를 전체 진폭의 평균으로 나눈 백분율로 구하며 진폭의 변화률을 뜻한다. 임상에서는 3.81% 이하일 때 정상적인 음성으로 평가한다[14].

$$\text{Shimmer}(\%) = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=0}^{N-1}|Po - Po(i+1)|}{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} Po(i)} \times 100 \tag{5}$$

3. 실험 결과

3.1 모음 발성의 EGG 분석

모음 /a/를 2초간 발성하여 기록한 음성신호와 EGG를 Fig. 4에 제시하였다. 파형을 자세히 보기 위하여 0.1초 구간만 그래프로 제시하였으며, 음성과 EGG 모두 주기성을 보이지만 음성신호에는 기본주파수에 고조파가 실려 있다. 성대 운동에 의한 EGG의 기본주파수는 음성의 발화기본주파수이며 음성신호의 주기와 일치함을 볼 수 있었다.

EGG 신호의 잡음을 제거하기 위하여 이동평균을 취하고 미분하여 최대점, 최소점, 제로 크로싱 지점을 검출하였다(Fig. 5). 미분신호의 최소값에서 제로 크로싱 지점까지는 폐소기이며, 최소값에서 최대값까지가 폐쇄기이다. 최소값과 최소값 사이의 구간이 EEG 파형의 한 주기가 된다.

모음 /a/,/e/,/i/,/o/,/u/를 2초간 발성하고 기록한 음성 및 EGG를 Fig. 6에 제시하였다. 모음의 종류에 따라 음성 파형은 특징적인 패턴을 지니고 있으며 EGG 신호는 진폭은 다르게 나타나지만 기본주파수는 음성신호와 동일하였다. EGG를 분석하여 pitch, CQ, SQ, jitter, shimmer의 결과를 Table 1에 제시하였다. 자연스러운 발성을 유도하여 기록한 결과이며 각 모음에 대한 분석 파라미터는 모두 정상범위에 속하였다.

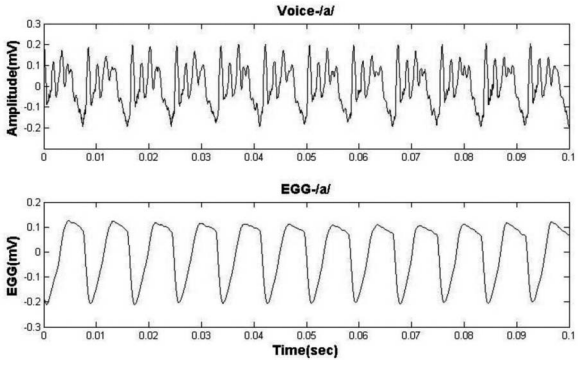

Fig. 4. Raw waveforms of vowel sound (upper) and EGG (lower)

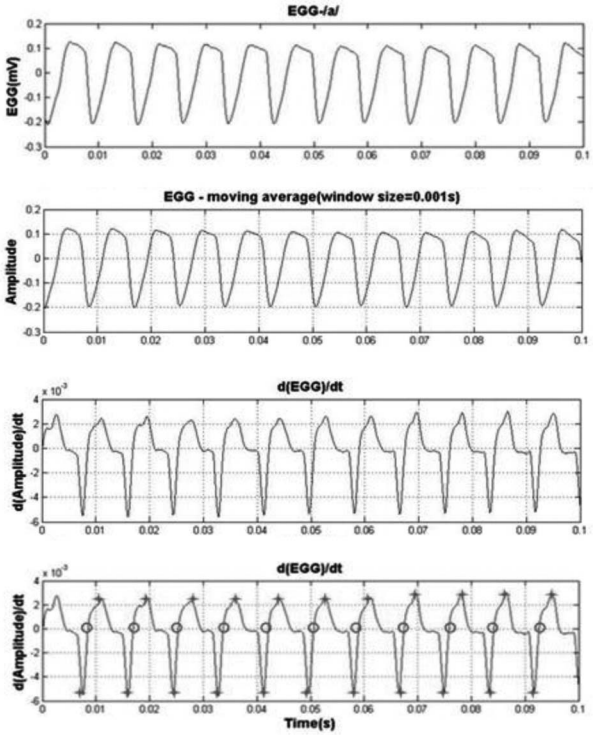

Fig. 5. Detection of the characteristic points from differentiated EGG waveform. Symbol (+) is made for the maximum and minimum values. Symbol (circle) is marked for the zero crossing from negative to positive.

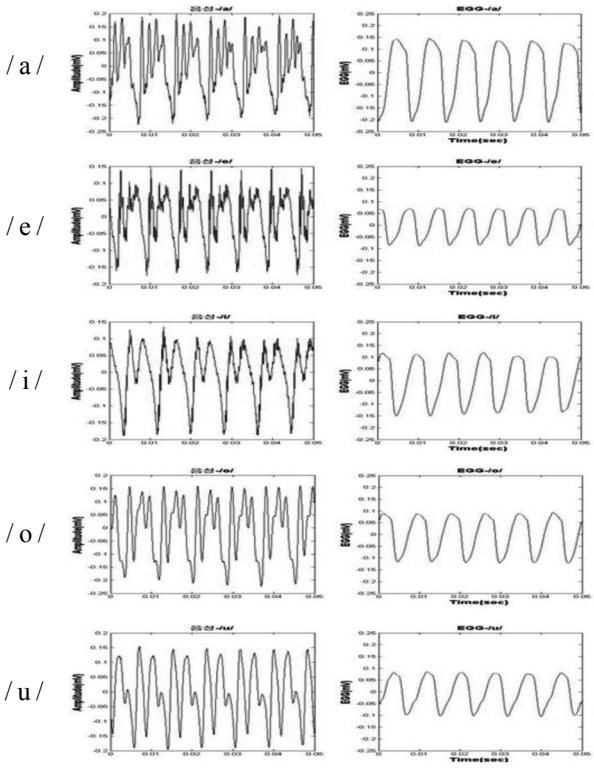

Fig. 6. Waveforms of vowel sounds and EGGs.

Table 1. Analytical results of vowels(/a/,/e/,/i/,/o/,/u/), pitch, CQ, SQ, jitter, shimmer

	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/
Pitch (Hz)	121	110	120	122	120
CQ (%)	48.82	53.74	53.74	50.31	48.97
SQ (%)	240.27	262.67	283.14	200.10	247.66
Jitter (%)	0.37	0.26	0.33	0.57	0.43
Shimmer (%)	1.80	1.67	3.16	1.17	1.33

3.2 노래 부르기의 기본주파수 분석

음정을 높여가며 발성하는 동안 기록한 EGG에서 pitch를 분석하여 기본주파수의 변화에 대한 그래프를 Fig. 7에 제시하였다. 낮은 도에서 높은 도까지 해당하는 음표를 1초 간격으로 증가시키면서 발성하고 기록한 결과이다. 처음과 끝부분이 대략 125~250 Hz로 1옥타브의 변화를 보이고 있다. 음계가 높아질수록 pitch 변동률이 증가하는 양상을 보였다. 음계를 높여감에 따라 Fig. 7에서 pitch가 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 이러한 결과는 EGG의 pitch 정보를 이용하여 발화기본주파수를 분석 가능함을 보여준다.

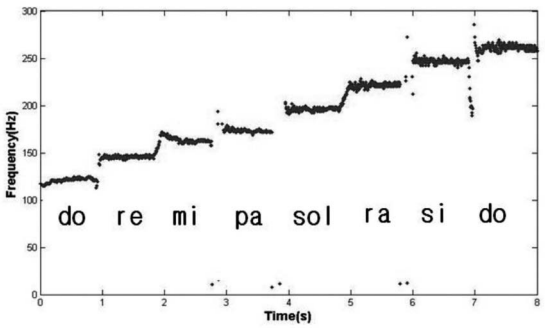

Fig. 7. Tracing of fundamental frequencies of voices increasing tones step by step.

노래를 부를 때 음정을 조절하는 것은 중요한 기능이며 음표에 따라 음정의 높이와 발성기간을 조절하여야 한다. Fig. 8은 "학교종" 노래의 1절 처음 두 마디를 부르는 동안 기록한 EGG로부터 pitch를 추출하여 분석한 결과이다. 노래를 부르는 동안 음계에 따라 EGG의 기본주파수가 비례적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 노래를 부르는 동안 pitch 데이터는 유성음 구간에서만 나타나며 무성음 구간에서는 표시되지 않았다. 이는 유성음 구간에서만 성대진동이 있으며 무성음 구간에는 성대진동을 동반하지 않는 발성 특성에 의한 것이다.

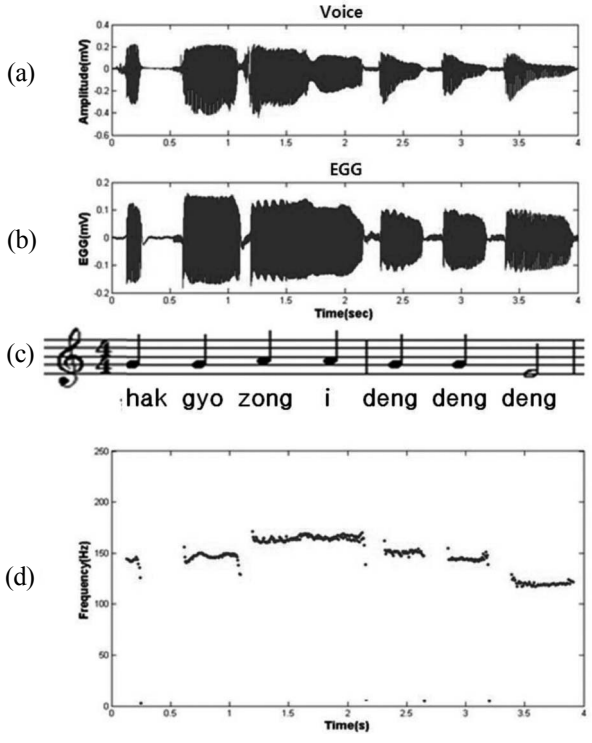

Fig. 8. Tracing of fundamental frequencies during singing a song; (a) waveform of Voice, (b) waveform of EGG, (c) musical notes, and (d) tracing of fundamental frequencies.

4. 고찰

EGG는 성대의 진동에 따른 신호이므로 발성에서 유성음에 대해서만 반응하며 무성음은 기록되지 않는다. 본 연구에서는 유성음으로만 구성되는 모음 발성 시에 EGG를 효율적으로 기록할 수 있으며 본 연구에서는 단모음인 /a/, /e/, /i/, /o/, /u/를 사용하였다. 아울러 말소리에서 EGG를 평가하기 위하여 음정을 가변시키는 발성에서 분석을 시도하였다.

모음 발성 시에 기록되는 EGG에서는 성대진동의 분석 파라미터인 pitch, CQ, SQ, jitter, shimmer 등을 분석할 수 있었다. Pitch와 CQ, SQ는 발성 고유의 값이지만 jitter와 shimmer는 정상범위가 존재한다. 모음/a/,/e/,/i/,/o/,/u/를 발성하였을 때 jitter와 shimmer는 임상에서는 각각 1.04%, 3.81% 이하일 때 정상적인 음성으로 평가하고 있으며[14], 본 연구에서 5종류의 모음 발성 분석 결과가 모두 정상범위에 속했다.

현재 EGG 장비는 대부분 통합 음성분석도구로 이용되며 스트로보스코프, 음성분석시스템 또는 호흡측정기 등과 통합되어 사용되고 있다. 주된 사용은 후두진단시스템의 일부로 EGG가 사용되고 있으며 음성분석에서 발화기본주파수 모니터링에는 단독 장비가 요구되었다. 따라서 기존 EGG 시스템을 이용하는 데는 장소와 움직임에 제약이 따르며 공간, 움직임, 자세 등에 대하여 덜 구속적인 사용자 중심의 EGG시스템이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 EGG장치의 소형화를 통해 공간적 제약을 줄이고 이동성 확보가 가능한 시스템을 구현하였다. 본 연구에서 구현한 EGG 증폭기는 배터리 전원을 사용하며 소형으로 제작되어 다양한 장소에서 사용이 가능하다. 기록을 위해서는 PC 또는 음성기록을 위한 휴대용 장비를 사용할 수 있으며 분석은 PC에서 분석프로그램으로 수행된다.

Askenfelt 등은 접촉식 마이크로폰과 EGG를 통해 기본 주파수를 측정하여 그 관계를 증명하였다[15]. 이후 공기역학적 검사와 EGG검사의 기본주파수에 차이가 없다는 것이 밝혀졌다. 또한 후두원음의 생리학적 기본주파수를 측정할 수 있기 때문에 음향학적인 방법보다 원활하게 측정할 수 있다[16]. Colton 등도 음성과 EGG의 기본주파수가 일치한다고 보고하였다[2]. 음성과 EGG의 기본주파수는 동일하므로 EGG를 분석하여 음성의 발화기본주파수를 측정할 수 있다. 본 연구에서 구현된 EGG시스템을 사용하여 음성과 EGG 신호를 동시에 검출할 수 있으며 EGG 분석 만으로 음성의 발화기본주파수의 변화를 모니터링 할 수 있다.

발성에서 강도를 높이면 음정의 변화가 유발되며 이는 노래 부르기 또는 일상대화에 있어 편안한 발성 훈련에 도움을 줄 수 있다. 또한 발성훈련을 위한 소형화된 EGG 시스템은 유헬스케어 시스템의 생체신호의 일부로 사용되어 원격지에서도 모니터링 가능하다[17]. 음계에 따른 발성연습은 성악을 전공하는 데 있어 중요한 평가요소이며 청음과 피드백 관계이다. 본 연구에서 구현한 시스템은 자가적으로 발성훈련이 가능하며 발성 연습에 있어 음정을 조절할 때 피드백 정보를 제공하여 정확한 음정을 내도록 훈련하는 시스템으로 활용 가능함을 보여준다. 악보를 보고 노래를 부르는 경우 음정의 정확도를 객관적으로 평가하는 시스템은 전문가의 도움을 받는 것이 일반적이다. 본 연구에서 '학교종' 노래의 첫 소절에서 음계에 따른 발성의 기본주파수를 시간에 따른 그래프로 Fig. 8에 제시하였다. 이 결과는 음계에 따른 음정의 변화를 기본주파수 분석으로 평가할 수 있음을 의미한다. 노래 부르기에서 기본주파수의 분석을 통하여 시각적으로 음정의 변화를 확인할 수 있으므로 자가적인 피드백이 가능하므로 발성의 평가 및 교정에 유용하게 이용될 것으로 기대된다.

EGG는 음성질환 환자에서 성대 진동의 이상 유무를 확인하기 위하여 주로 사용되었으나 본 연구에서는 EGG를 일상생활에서 발성 평가 및 훈련에 활용하는 방안으로 다양한 발성에서 발화기본주파수의 변화를 기록하여 발성 피드백에 적용 가능함을 제시하였다.

5. 결론

말소리를 발성하는 동안 EGG를 측정하여 음성의 기본주파수를 추출하고 발성을 평가하여 정량화된 지표인 pitch, CQ, SQ, jitter, shimmer를 구하고 이를 통해 발성 훈련이 가능한 시스템을 구현하고자 하였다. 소형 EGG 증폭기와 EGG 신호를 기반으로 EGG 파라미터 및 발화기본주파수를 분석하는 도구를 개발하였다.

EGG 신호를 기반으로 모음 발성, 발성강도의 변화, 음정의 변화

및 노래 부르기에서 기본주파수의 변화를 분석하였으며, 유성음 구간에서 기록되는 EGG 파형을 분석하여 발화기본주파수를 검출하였다.

본 연구에서 제시하는 EGG 시스템은 소형이며 배터리로 구동되며 휴대용으로 주변 소음의 간섭을 배제하고 발성 바이오피드백에 활용 가능하며, 음성훈련, 발성평가 및 훈련 시스템에 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

[1] C. T. Sasaki, "Development of laryngeal function: etiologic significance in the sudden infant death syndrome", *Arch. Otolaryngol*., Vol. 103, pp. 8-15, 1977.

[2] R. Colton and J. K. Kasper, *Understanding Voice Problems. A physiological respective for diagnosis and treatment(2nd ed.)*, Williams & Wilkins, Philadelphia, pp. 58-67, 1996.

[3] Y. I. Son, *Otorhinolaryngology*, Iljogak, Seoul, 2009.

[4] S. Hertegard and J. Gauffin, "Glottal area and vibratory patterns studied with simultaneous stroboscopy, flow glottography, and electroglottography", *J. Speech Hear Res*., Vol. 38, pp. 85-100, 1995.

[5] J. G. Svec and H. K. Schutte, "Videokymography : high-speed line scaning of vocal fold vibration", *J. Voice*, Vol. 10, pp. 201-205, 1995.

[6] R. Timcke, H. Leden, and P. Moore, "Laryngeal vibrations : Measurements of the glottis wave", *Arch. Otolaryngol*., Vol. 68, pp. 1-9, 1958.

[7] M. P. Fabre, "Un procede electrique percutane d'insciption de l'accolement glottique au cours de la phonation: Glottographie die haute frequence, Premier resultants", *Bull. Acad. Nat'l Med*., Vol. 141, pp. 66-69, 1957.

[8] H. Asano, "Application of the ultrasonic pulse method on the larynx", *J. Otolaryngology of Japan*, Vol. 71, pp. 859-916, 1968.

[9] L. Lisker, A. Abramson, F. Cooper, and M. Schvey, "Transillumination of the larynx in running speech", *J. Acoust. Soc. Am*., Vol. 45, pp. 1544-1546, 1969.

[10] G. J. Borden, K. S. Harris, and L. J. Raphael, *Speech Science Primer*, Williams & Wilkins, Philadelphia, 1980.

[11] L. L. Frans, M. T. Ram, and B. S. Gordon, "Electroglottographic studies of staffieri neoglottis". *The Laryngoscope*, Vol. 91, pp. 971-975, 1981.

[12] D. G. Childers and A. K. Krishnamurthy, "A critical review of electroglottography", *Crit. Rev. Biomed. Eng*., Vol. 12, pp. 131-161, 1985.

[13] F. F. Orlikoff, "Assesment of the dynamics of vocal fold contact from the electroglottogram : Data from normal male subjects", *J. Speech Hear Res*. Vol. 34, pp. 66-72, 1991.

[14] P. Boersma and D. Weenink, *Praat Manual*. http://www.fon.hum.uva.nl/praat/ (retrieved on Jan. 4, 2013).

[15] A. Askenfelt, J. Gauffin, J. Sundberg, and P. Kitzing, "A comparison of contact microphone and electroglottograph for the measurement of vocal fundamental frequency", *J. Speech Hear Res*., Vol. 23, pp. 258-273, 1980.

[16] G. B. Houben, R. Buekers, and H. Kingma, "Characterization of the electroglottographic waveform: a primary study to investigate vocal fold functioning", *Folia Phoniatrica*, Vol. 44, pp. 269-281, 1992.

[17] S. J. Jung, T. H. Kwon, and W. Y. Chung, "Non-invasive healthcare system for estimation of vascular condition in IP-enabled wireless network", *J. Sensor Sci. & Tech*., Vol. 22, No. 1, pp. 76-83. 2013.