

성악도의 두성구와 흉성구 발성에 대한 음향학적 분석

성균관대학교 의과대학 강북삼성병원 이비인후과학교실

진 성 민

= Abstract =

Acoustic Analysis of Singing Voice

Sung Min Jin, M.D.

Department of Otolaryngology, Kangbuk Samsung Hospital, School of Medicine, Sungkyunkwan University, Seoul, Korea

The pitch range of the human voice is variable, extending from chest register to falsetto. Although numerous studies have investigated after laryngeal mechanism description of registers, systematic and objective studies were lack. The purpose of this study was to analyze and compare head register with chest register of singers acoustically. Fifteen healthy tenor major students were selected. Fifteen healthy untrained adults were the control group for this study. Long term average(LTA) power spectrum using the Fast Fourier transform(FFT) algorithm and Linear predictive coding(LPC) filter response were made during /a/ sustained in both head(G4, 392Hz) and chest registers(C3, 131Hz). Statistical analysis was performed using Mann-Whitney test. In the LTA power spectrum, head register of singer has increased level(energy gain) in the frequency band of 2.2-3.4kHz($p<0.01$), and 7.5-8.4kHz($p<0.01$, $p<0.05$). Chest register of singer has increased level in the frequency band of 2.2-3.1kHz($p<0.01$), 7.8-8.4kHz($p<0.05$) and around 9.6kHz($p<0.01$). LTA power spectrum reveals a peak of acoustic energy around 2500Hz known as the singer's formant and another peak of acoustic energy around 8000Hz in singer's voice.

KEY WORDS : Register · Singer's formant.

서 론

성구(register)란 인간에 있어서 유사한 후두의 기능을 통하여 생성되는 음의 모임¹⁾ 또는 어떤 음의 높낮이

논문접수일 : 2002년 4월 30일

심사완료일 : 2002년 5월 30일

책임저자 : 진성민, 100-634 서울 중로구 평동 108번지

성균관대학교 의과대학 강북삼성병원 이비인후과학교실

전화 : (02) 2001-2266 · 전송 : (02) 2001-2273

E-mail : strobojin@hanmail.net

나 크기의 범위를 일정하게 유지할 수 있는 음성의 질로서, 우리가 분명하게 지각적으로 느낄 수 있는 음성의 영역²⁾이라 할 수 있다. 그러나 이에 대한 분류는 학자들에 따라 약간의 차이를 보이면서 다양하게 분류되어왔다.³⁻⁵⁾

전통적인 성악교육에서는 발성 시 효과적이고 아름다운 소리를 위하여 하나의 성구에서 또 다른 성구로 이행하는 과정을 보다 부드럽게 이루기 위한 발성교육을 받는데, 이러한 발성기법은 갑상피열근에 의해 증가된 성대의 내전운동을 상쇄하기 위하여 성대돌기가 양 방향으로 서로 벌어져야 하는데, 이와 같은 발성을 위해서는 성

대 진동 때 점막의 진동 폭(amplitude)과 폐로부터의 공기압간에 적절한 조화가 필수적이다.³⁾ 이를 위한 훈련법으로 decrescendo로 부터 부드럽게 crescendo로 이루어지도록 하는 *messa di voce* 훈련법이 있는데, 이 방법 역시 성대의 내전 운동과 폐의 공기압간의 조화에 기초를 둔 훈련법이라 할 수 있다.³⁾⁵⁾

목소리에 대한 연구가 이루어진 이래로 다양한 학문분야의 다양한 학자들이 성구의 특징을 알아보려는 연구가 이루어져왔다. 주로 연구 초기에는 청각심리검사(psychoacoustic analysis)에 의존한 연구들이 가장 많았고,⁶⁾ 최근 들어서 Colton⁷⁾의 발화음에서 modal과 falsetto register에 대한 스펙트럼분석, Vilkman 등⁸⁾의 변이 영역(transition area)에 대한 역여과(inverse filtering)와 전기성문과형검사(EGG)를 이용한 연구, 그리고 Murry 등⁹⁾의 성구에 따른 성문 모양(glottal configuration)의 변화에 대한 연구를 비롯한 여러 연구논문이 발표되었다. 그러나 성악가들의 발성에 있어서 각각의 성구에 대한 객관적인 음향학적 분석(acoustic analysis)과 관계된 연구들은 드물고, 특히 성악가에 대한 두성구(head register)와 흉성구(chest register)의 음향학적 분석에 따른 차이점에 대한 연구는 발표된 바가 없다.

이에 저자들은 성악가의 목소리 중 대표적인 두성구와 흉성구에 대한 특징을 음향학적 분석을 통하여 알아보고자 하였다.

대상 및 방법

연구대상은 동일한 음악대학교 성악과에 재학 중이며, 흉성구와 두성구를 명확하게 발성하기에 용이한 테너성부의 학생 15명을 대상으로 하였으며, 이들이 성악에 대한 교육을 받은 기간은 평균 4.6년이었고 평균연령은 23.3세 이었다(Table 1).

음성표본은 방음장치가 된 방에서 두성구는 G4음(392Hz), 흉성구는 C3음(131Hz)을 한국인의 모음 /a/를 이용하여 5초 이상 발성토록 하였으며, 이때 음악대학교 대학원생 1명과 교수 1명이 듣고 판단하여 적절한 두성구와 흉성구로 발성된 경우를 녹취하였다. 두성구로 발성 시 F4#, G4#, A4, 그리고 흉성구 발성 시 B3b음을 발성한 경우들은 G4나 C3음보다 두성구 또는 흉성구를 보다 용이하게 발성할 수 있다고 요구했던 대상들의 경우이다. 발성된 음성은 SONY DAT recorder TCD-D7을 이용하여 우선 녹음하였으며, 후에 컴퓨터에 입력하였고 이때 표본에 대한 녹취 비(sampling rate)는 20kHz로 하였으며 음압 준위(sound pressure level)는 70dB에 일치하도록 노력하였다. 입력된 신호는 Computerized Speech Lab. (CSL, Kay elemetrics, Model 4300B, USA) 프로그램 중 Fast Fourier Transform (FFT) -based power spectrum, FFT의 algorithm을 이용한 Long term average(LTA) power spectrum

Table 1. Profile of volunteer

No.	Name	Birth of date	Education periods(yrs.)	Notes for head register	Notes for chest register
1	SW Jin	09/12/77	6	G4	C3
2	YS Hwang	11/30/74	4	F4#	C3
3	HJ Kwon	01/19/77	4	G4	C3
4	SB Kim	03/07/72	5	G4	C3
5	JS Park	10/04/78	4	G4	C3
6	YH Shim	11/19/80	4	G4	C3
7	HY Yom	08/04/80	4	F4#	C3
8	JT Park	02/13/79	3	A4	C3
9	SS Choi	09/29/73	6	G4#	C3
10	SH Eom	05/05/75	6	G4	C3
11	TS Jun	12/23/73	3.5	G4	C3
12	IJ Yang	02/19/76	5	G4	B3b
13	JK Jo	05/30/79	5	A4	C3
14	HJ Kim	10/11/77	6	G4	C3
15	KM Park	04/05/78	6	G4	C3

그리고 Linear Predictive Coding(LPC) filter response에 의한 주파수 분석을 이용하여 분석하였고, 이때 FFT power spectrum과 LTA power spectrum을 이용한 분석에서는 frame size를 64 point(3.2msec)로하여 각 주파수별 에너지 이득(energy gain)을 비교하였다.

대조군은 후두 및 조음기관에 이상이 없고 대상군과 비슷한 연령대의 건강한 성인 남자 15명을 대상으로 하였고, 평소 발성법으로 G5(784Hz)와 C4(261Hz)를 발성토록 하여 컴퓨터에 직접 입력하여 분석하였다.

Table 2. LTA power spectrum of head register

Frequency (Hz)	Singers gain (dB)	Control gain (dB)	Variance gain (dB)
312.5	34.82	39.26	-4.44
625.0	44.52	49.66	-5.14
937.5	47.42	51.70	-4.27
1250.0	48.12	52.95	-4.83
1562.5	43.59	49.81	-6.22
1875.0	35.72	41.59	-5.87
2187.5*	42.59	30.98	11.60
2500.0*	50.04	35.61	14.42
2812.5*	52.49	39.49	13.00
3125.0*	51.42	38.80	12.62
3437.5*	45.45	39.19	6.26
3750.0	35.96	39.59	-3.63
4062.5	27.98	37.11	-9.12
4375.0	23.96	30.93	-6.96
4887.5	21.89	31.67	-9.78
5000.0	20.14	30.25	-10.11
5312.5	20.27	33.41	-13.13
5625.0	20.91	32.07	-11.15
5937.5	22.05	31.15	-9.10
6250.0	24.01	29.16	-5.15
6562.5	25.13	25.36	-0.23
6875.0	24.22	24.87	-0.64
7187.5	23.87	23.92	-0.05
7500.0**	25.38	19.66	5.71
7812.5*	26.41	18.23	8.17
8125.0*	26.93	16.78	10.15
8437.5**	26.83	20.96	5.86
8750.0	25.63	21.33	4.29
9062.5	23.97	23.96	0.01
9375.0	22.31	22.81	0.00
9687.5	20.39	19.12	1.27
10000.0	15.87	15.97	-0.10

* : p<0.01

** : p<0.05

통계학적 검증은 통계분석 패키지인 Statistical Packages for Social Science(SPSS)중 Mann-Whitney test를 이용하여 각 결과치를 비교하였고, 유의 수준은 95%와 99%로 하여 검증하였다.

결 과

LTA power spectrum을 이용한 분석에서 주파수별 energy gain은 두성구의 발성인 경우 0Hz에서 10000Hz의 영역 중 2200~3400Hz에 이르는 영역(p<0.01)과 7500~8400Hz의 영역에서(p<0.01, p<0.05) 성악가가 대조군에 비하여 의미 있는 증가를 보였고(Table 2)(Fig. 1), 얻어진 음성 표본 중 임의의 한 점에서 얻어진 FFT power spectrum과 LPC filter response 분석에 따른 그래프도 동일한 결과를 보여 주었으며, 특히 성악가들 중 10번째 대상의 경우는 2200~3400Hz 영역에서 보이는 모양과 동일한 에너지 곡선모양이 7500~8400Hz 근처에서 관찰되었다(Fig. 2). 흉성구의 발성에서도 두성구의 발성 경우와 유사하게 2200~3100Hz 영역(p<0.01)과 7800~8400Hz의 영역(p<0.05) 그리고 9600Hz(p<0.01) 주변에서 성악가의 경우가 대조군에 비하여 에너지가 의미있게 증가되어 있었으며(Table 3)(Fig. 3), 얻어진 음성 표본 중 임의의 한 점에서 얻어진 FFT power spectrum과 LPC filter response 분석에 따른 그래프 에서도 역시 동일한 결과를 보여주었다(Fig. 4).

고 찰

인간의 목소리에 있어서 성구에 대한 정의나 분류는 앞서 언급한 바와 같이 연구자들에 따라 다양하다. Colton은⁷⁾ 여러 학자들의 의견을 정리하여 크게 성대진동의 양상이나 성대의 길이 및 두께를 이용한 생리학적 부분과, 음질에 따른 부분으로 나누어 성구에 대한 정의를 설명하였다. 성구에 대한 분류 역시 연구자에 따라 다양한데, 수십년 전 몇몇 미국의 성악 선생들은 기존의 성구에 대한 용어를 무시하고, 언어학자들에 의해 만들어진 "modal"과 "loft"라는 용어를 적용하려는 시도가 있었다. 그러나 이러한 용어들은 전통적인 성악 교육과정에서 음색에 대한 표현에 한계를 보여 최근 들어서는 노래하는데 있어서 성구를 표현하는 데는 더 이상 사용되지 못하고 있다.⁵⁾ 이후에도 남성은 흉성구(chest or modal register),

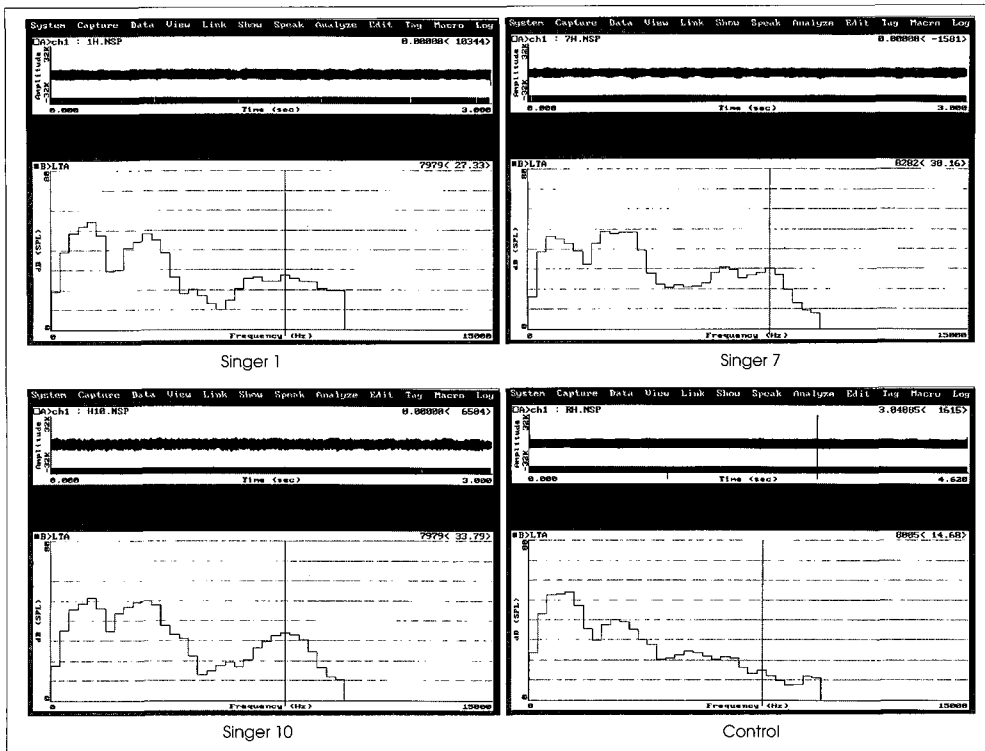


Fig. 1. LTA power spectrum (Head register).

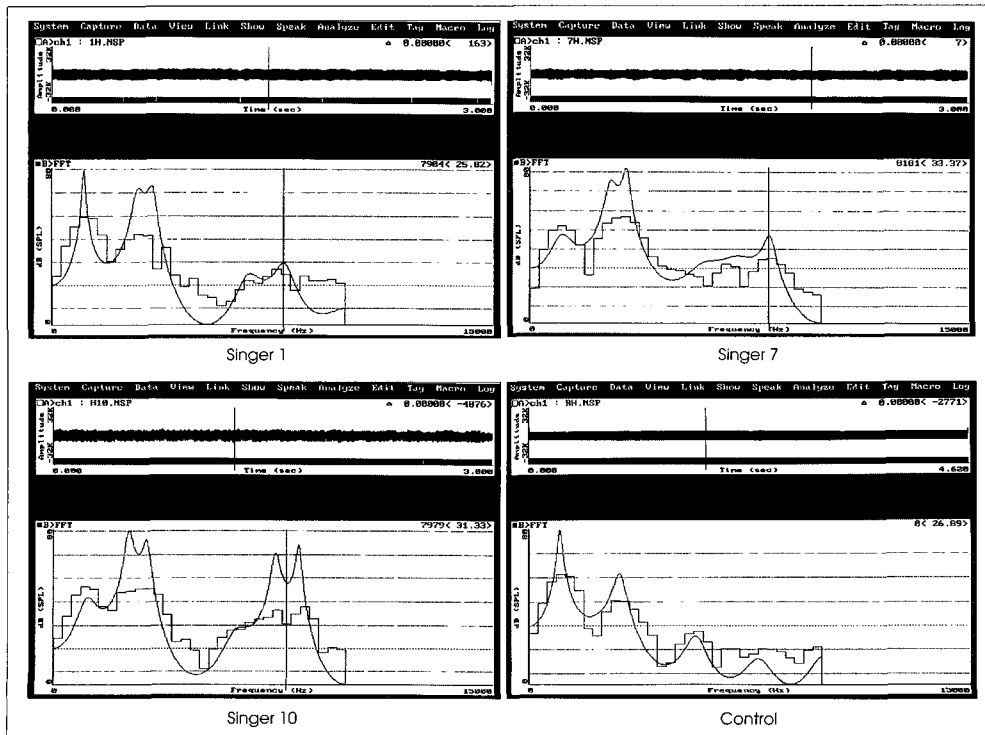


Fig. 2. FFT power spectrum and LPC filter response (Head register).

Table 3. LTA power spectrum of chest register

Frequency (Hz)	Singers gain (dB)	Control gain (dB)	Variance gain (dB)
312.5	38.32	35.89	2.43
625.0	43.87	42.88	0.99
937.5	44.29	44.74	-0.45
1250.0	41.92	42.23	-0.30
1562.5	32.13	34.89	-2.76
1875.0	21.96	19.22	2.75
2187.5*	33.14	21.37	11.76
2500.0*	40.87	26.83	14.03
2812.5*	42.33	26.79	15.54
3125.0*	40.11	24.78	15.32
3437.5	35.11	28.71	6.39
3750.0	28.33	28.85	-0.52
4062.5	22.37	25.11	-2.73
4375.0	18.42	19.69	-1.27
4887.5	16.67	17.85	-1.17
5000.0	14.81	18.40	-3.26
5312.5	14.08	17.14	-3.05
5625.0	14.18	14.22	-0.04
5937.5	14.79	16.42	-1.63
6250.0	15.43	17.12	-1.68
6562.5	16.01	14.85	1.15
6875.0	15.73	16.10	-0.37
7187.5	15.82	14.05	0.76
7500.0	16.17	12.38	3.78
7812.5**	16.24	7.34	8.90
8125.0**	16.21	11.49	4.71
8437.5**	16.43	12.57	3.85
8750.0	16.43	12.66	3.77
9062.5	16.59	13.23	3.36
9375.0	16.79	13.30	3.48
9687.5*	16.73	11.33	5.40
10000.0	13.18	6.30	6.87

* : p<0.01

** : p<0.05

두성구(head register), 가성구(falsetto register)로 나누고, 여성은 흉성구(chest or modal register), 중성구(middle register), 두성구(head register)로 나누어 발표한 Vernard의 분류도 보고된 바 있으며,⁵⁾ 최근 들어 Titze³⁾는 그 동안의 성구에 대한 분류를 종합하여, 성구는 말할 때와 노래할 때 모두 관찰되며, 말할 때의 성구(speaking register)는 pulse, modal 및 falsetto 성구로, 노래할 때의 성구(singing register)는 흉성구, 두성

구 및 가성구로 구분하여 기술하였다. 그러나 아직까지도 성구의 분류에 대해서는 논란의 여지가 있다.

성구에 대한 분류뿐 아니라 각각 성구의 특징들에 대한 연구들도 이루어 졌는데, Müller(1840)는 해부학적 측면과 생리학적 측면에 기초하여 흉성구와 가성구의 특징을 설명한 바 있으며⁸⁾, 그 이후에도 Colton⁷⁾¹⁰⁾에 의하여 흉성구와 가성구에 대한 여러 가지 연구들이 계속 이루어졌다. 그는 이들 두 가지 성구의 스펙트럼에 있어서 두성구가 가성구에 비하여 에너지의 증가와 함께 더 많은 harmonic partial이 관찰된다고 하였고, 다른 보고에서도 frequency bandwidth와 기본주파수에서 음의 강도를 흉성구와 가성구를 구별하는 하나의 지표로 제시하였다. 이와 같은 음향학적 연구와 함께 Colton 등⁶⁾은 청각심리검사를 통해 얼마나 정확히 성구를 구분할 수 있는지에 대하여 기술하였는데, 이는 성구를 구별함에 있어 음향학적 검사와 같은 객관적인 검사뿐만 아니라 듣고 판단하는 청각심리검사도 매우 중요한 부분임을 시사하는 것이라 할 수 있다. 성악가들에 있어서는 특히 이러한 청각심리적인 판단이 중요시 되는데, 이는 성악이라는 것이 단순한 소리의 질보다는 예술적인 측면이 강조되는 것이기 때문으로 생각된다.

최근 들어서는 하나의 성구에서 다른 성구로 이행되는 과정(transition of register)에 대한 연구도 보고되고 있는데, Vilkman 등⁸⁾은 흉성구에서 두성구로 이행되는 과정에서 역여과 측정법(inverse filtering)과 전기성문과 검사를 이용하여 성구의 이행되는 과정을 관찰하여 보고 하기도 하였으며, Titze²⁾는 성구의 이행과정을 주기성 이행(periodicity transition)과 음질 이행(timbre transition)으로 분류하여 설명하였으며, 성문하 공명이 성대의 driving pressure를 방해 함으로써 성구의 이행이 나타난다는 가설을 설명하고 노래할 때의 성구(singing register)는 timbre transition과 밀접한 관계가 있으며, 따라서 제 1 성문하 음형대(subglottal formant)에 기초하여 노래할 때의 성구의 전환(shift)이 일어난다고 주장 하였다.

Vocal ring(Singer's formant)에 대한 연구는, Bartholemew(1934)가 훌륭한 오페라 가수의 음성은 3000Hz 근처에서 에너지가 집중되어야 한다고 처음 언급한 이래, 약 40년이 지난 후 Sunberg(1972, 1978)에 의하여 음악 음형대(singer's formant)에 대한 물리학적 설명이 이루어 졌는데, 그는 유명 테너가수의 목소리와 오케스

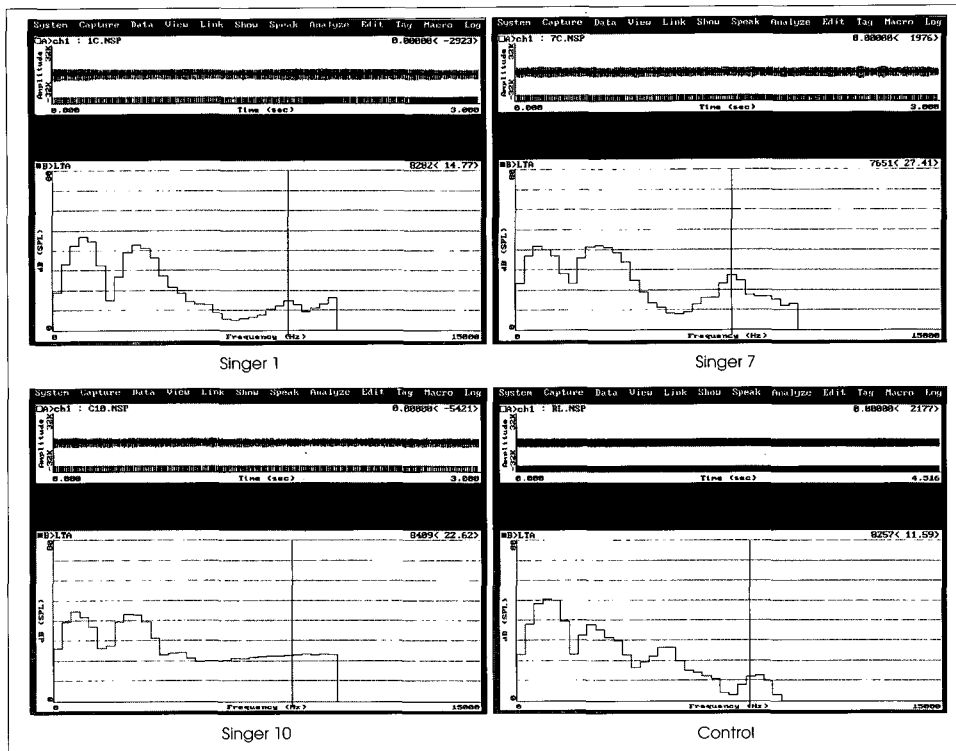


Fig. 3. LTA power spectrum (Chest register).

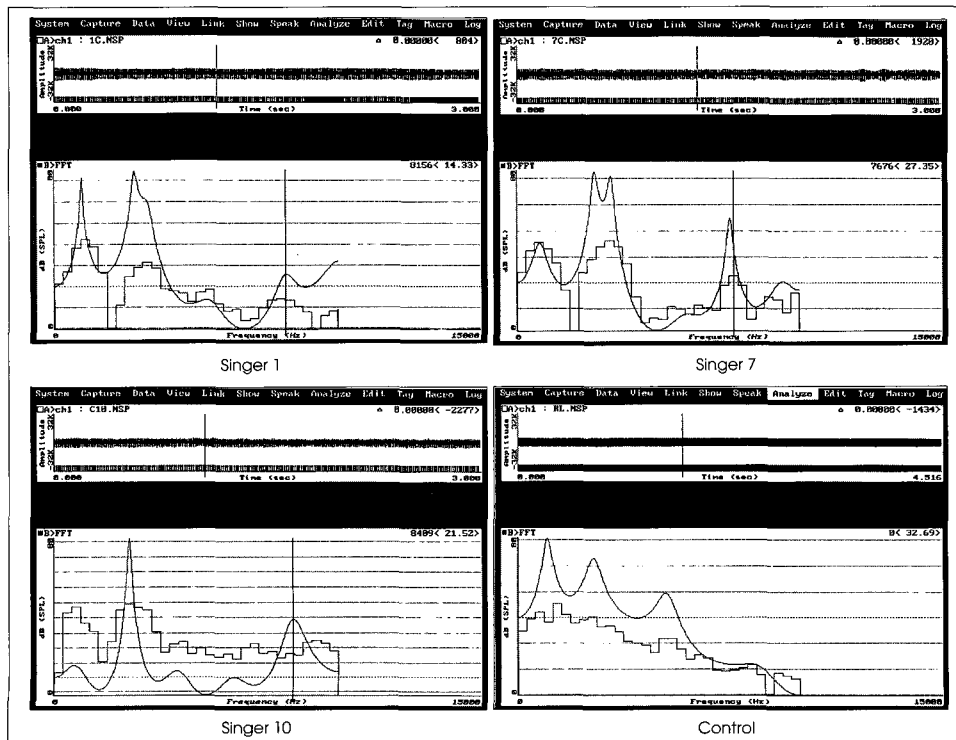


Fig. 4. FFT power spectrum and LPC filter response (Chest register).

트라의 소리를 long term average spectrum(LTAS)을 이용하여 분석함으로써 오케스트라의 연주 속에서 성악가의 목소리가 명확하게 전달 될 수 있는 이유를 설명하였고, 성도상에서 상후두에 작은 공명기를 이용하여 음악 음형대에 대한 모형작업(modeling)을 시도하였다.³⁾

저자들은 성악가들에 있어서 가장 대표적이라 할 수 있는 두성구와 흉성구를 진보된 음향분석 기기를 이용하여 분석함으로써 성악가들의 발성 시 두성구와 흉성구 간의 차이점 및 발성교육을 받지 않은 일반인들과의 차이점을 알아보고자 하였다. 본 연구에서는 LTA power spectrum, FFT power spectrum, 그리고 LPC frequency response를 이용하여 주파수별 energy gain의 상태와 음형대 주파수의 분포를 살펴보았는데, 각각 성구의 음향학적 분석에 적용한 LTA power spectrum, FFT power spectrum, 그리고 LPC frequency response는 대표적으로 디지털 신호처리를 이용한 소리의 분석방법이다.

선택된 데이터에 대한 FFT를 이용하여 얻어지는 FFT spectrum은 입력신호의 주파수별 전력크기를 나타낸 것이며, LPC에 의한 분석은 소리의 spectral envelop를 보여주어 음형대를 확실하게 관찰 할 수 있다.¹¹⁾

본 연구에서 LTA power spectrum 분석 결과 두성구와 흉성구 모두 기존의 음악 음형대가 형성되는 부분이라 할 수 있는 2500Hz 내외에서 성악가들이 대조군에 비하여 energy gain이 의미 있게 높은 것으로 나타났고, 음성 표본 중 임의의 한 점에서 측정된 FFT와 LPC를 이용한 분석의 경우에서도 이 영역에서 음악음형대로 생각되는 에너지 집중대(energy peak)를 관찰 할 수 있었다. 이는 성악가들의 경우 청각심리적으로 적절하게 발성된 두성구와 흉성구의 발성은 양자 모두 singer's formant의 형성과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 본 연구에서 특이 할 만한 점은 성악가의 경우 기존의 음악 음형대가 생성되는 부분 이외에 8000Hz근처에서 또 다른 energy peak가 관찰된다는 점이다. 이러한 현상이 왜 나타나는지에 대한 해석에는 물리학적 혹은 생리학적인 모형 작업을 통한 증명이 추가로 이루어져야 하겠지만, 성악가들이 적절하게 발성을 한 경우 일반인들에게는 나타나지 않는 또 다른 하나의 음형대가 존재 할 가능성을 생각해 볼 수 있다.

결론

성악가의 발성 시 두성구와 흉성구 모두 적절한 발성이 이루어졌을 경우, 모두 기존의 음악 음형대가 나타나는 영역인 2500Hz 근처에서 에너지 집중대가 관찰되었고, 그 외 8000Hz 근처에서 그 동안 알지 못했던 에너지가 증가되는 영역이 관찰되었다. 저자는 이를 일반인들과 달리 성악가의 목소리에서만 관찰될 수 있는 또 하나의 음형대로 생각하며, 이 영역에서의 에너지 증가는 어떤 본질을 가지며, 이것이 테너성부에서만 나타나는 것인지, 그리고 이 영역의 에너지 증가조건이 성악가들에게 있어서 교육적 도구로서 어떤 의미를 가지게 되는지에 대하여 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

중심 단어 : 성구 · 음악 음형대.

References

- 1) Leyerle WD : *Vocal development through organic imaginary*. 2nd ed. Mt Morris, NY : Leyerle publishing, 1986
- 2) Titze IR : *A framework for the study of vocal registers*. J Voice, 1988
- 3) Titze IR : *Principles of voice production*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall Inc, 1994 : 252-278
- 4) Sataloff RT : *Professional voice, The science and art of clinical care*. 2nd ed. San Diego. London : Singular Publishing Group Inc, 1997 : 147-165
- 5) Miller R : *The structure of singing*. New York : Schirmer Book, A division of Macmillan, Inc, 1986
- 6) Colton RH, Hollien H : *Perceptual differentiation of the modal and falsetto registers*. Folia Phoniatr. 1973 ; 25 : 270-280
- 7) Colton RH : *Spectral characteristics of the modal and falsetto registers*. Folia Phoniatr. 1972 ; 24 : 337-344
- 8) Vilkmán E, Alku P, Laukkanen M : *Vocal fold collision mass as a differentiator between registers in the low pitch range*. J Voice. 1995 ; 9 : 166-173
- 9) Murry T, Xu JJ, Woodson GE : *Glottal configuration associated with fundamental frequency and vocal register*. J voice. 1998 ; 12 : 44-49
- 10) Colton RH : *Some acoustic parameters related to the perception of modal falsetto voice quality*. Folia Phoniatr. 1973 ; 25 : 302-311
- 11) Kent RD : *Vocal tract acoustics*. J Voice. 1993 ; 7 : 97-117