

후두위치의 변화에 따른 Singer's Formant와 성대접촉률의 변화 연구

연세대학교 의과대학 이비인후과학교실, 음성언어의학연구소,¹ 진단방사선과학교실²

남도현¹ · 최성희¹ · 최재남¹ · 전석필² · 최홍식¹

= Abstract =

Analysis of Singer's Formant & Close Quotient During Change of the Larynx Position

Do Hyun Nam, MD¹, Seong-Hee Choi, MD¹, Jae Nam Choi, MD¹,
Suck Pil Chun, MD² and Hong-Shik Choi, MD¹

¹The Institute of Logopedics & Phoniatrics and ²Department of Radiology,
Yongdong Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Background and Objectives : The purpose of this study is to analyze the difference of Fundamental Frequency (Hz), Closed Quotient (Qx ; %), Intensity (dB), Vocal tract length and width (cm), formant frequency (Hz), level of formant frequency (dB) depending on the larynx position.

Materials and Methods : One professional male singer (career : 28 years) produced sustained vowel /a/, /e/, /i/, /o/, /u/ in two larynx position (higher, lower) with Dr. Speech and video fluoroscopy was used to quantify the vocal tract morphology.

Results : In lower larynx position, CQ is increased 9.8% and Intensity is increased about 10% and level of Formant Frequency is increased. And also Vocal tract length is longer 2.4cm, Vocal tract width (Anterior width : 0.4cm, lateral width : 0.2cm) is wider than in higher larynx position.

Conclusions : Singer's formant has a prominent spectrum envelope peak near 2400-2600Hz by clustering of F3, F4 and F5 near 3400Hz in lower larynx position.

KEY WORDS : Larynx position · Closed Quotient · Vocal tract length · Level of Formant Frequency · Singer's formant.

서 론

후두 위치에 대한 관심은 성악가들 사이에 많은 논쟁거리 중에 하나였다. 후두의 위치는 자연스럽게 유지하여 노래 하여야 한다는 사람과 다른 사람들은 훈련을 통하여 아래로 하강하여야 한다고 주장하는 사람도 있다. 이러한 후두 위치에 대한 논쟁은 음향학적으로나 음성학적 이유보다는 청각적인 느낌으로 후두가 높을 때는 대체로 가볍고 밝은 목소리를 후두가 아래에 있을 때는 깊고 무거운 느낌을 주기

때문에 사람들의 취향에 영향을 받는 것 같다. 이러한 밝거나 어둔 느낌의 목소리에 대한 개인의 취향은 대개 밝은 소리가 전달이 뛰어나는 것이라는 오해에서 생기는 것이나 소리의 어둡기와 밝기는 목소리의 전달력과는 관계가 없다고 알려져 있다.¹⁾

목소리의 어둡고 밝기는 후두의 위치에 의해 많은 영향을 받는데, 후두위치의 변화는 성도길이(vocal tract length)의 변화를 말하는 것으로 같은 사람에 있어서도 후두위치의 높고 낮음에 따라 성도가 짧아지거나 길어지고 성도길이의 변화는 공명강의 길이뿐만 아니라 공명강 전체의 면적의 변화를 뜻한다. 공명강의 길이와 면적의 변화는 공명주파수 변화를 가져오기 때문에 청각적으로나 공명감각적으로도 변화를 예상할 수 있을 것이다. 후두의 위치에 가장 영향을 많이 받는 것 중에 하나가 Singer's Formant라는 것은 많이 알려진 사실이다. 1934년 Bartholomew는 좋은 오

논문접수일 : 2004년 10월 14일
심사완료일 : 2004년 10월 28일
책임저자 : 최홍식, 135-720 서울 강남구 도곡동 146-92
연세대학교 의과대학 이비인후과학교실, 음성언어의학연구소
전화 : (02) 3497-3462 · 전송 : (02) 3463-4750
E-mail : hschoi@yumc.yonsei.ac.kr

페라 가수에서 좋은 음질을 만들기 위해서는 성도(Vocal tract) 조절로 이루어지며 대략 2800Hz 부분에 강한 스펙트럼이 나타나는 것을 밝음과 관련시켰다.²⁾ 그러나 실제로 성악가들은 공명에 대한 판단의 기준으로 공명감각에 의한 판단을 중요시하여 왔다. 이러한 공명감각에 의한 표현 중 대표적인 것으로 흉성(chest voice), 두성(head voice), 마스크라(maschera)라는 말로 표현한다. 마스크라라는 말은 공명의 감각적인 느낌이 안면부위에서 느껴진다는 것을 표현한 것으로 이탈리아발성에서는 일상적이고 보편적이 발성언어 중에 하나이다.

Titze는 성악가들은 모음마다 특정한 위치를 종종 느낀다고 하며, 그러한 느낌이 제자리를 찾았을 때를 모음이 “in focus”에 있다는 표현을 한다고 하고 있다. 그는 위치의 그런 인지력이 그 성도의 공명 특징에 기인할 수도 있다고 제안하고 있고,³⁾ Bloothoof와 Plomp의 연구에서는 발성테크닉에 따라 후두의 위치와 인후부의 공간이 변하는 것을 발견하였다.⁴⁾ Cleveland는 목소리의 형태와 그것에 있는 모음 formant의 주파수 사이의 관계의 연구에서 성악가의 스펙트로그램을 기초로 하여 여러 가지 서로 다른 발성테크닉(e.g., covered, open, throaty, pressed, or free)을 소리의 음색의 성질과 연관시켜 설명하였다.⁵⁾

Schutte and Miller는 성악가는 테크니컬한 발성훈련의 결과로 vocal tract을 조절할 수 있는데 이를 이탈리아 벨 칸토(Bel Canto) 발성에서는 “L’ impostazione della voce”라고 부른다. 또한 이러한 발성 훈련들은 발성 기능을 효과적으로 조절하고 성악가 음형대(Singer’s formant)에 영향을 미치는 것으로 생각된다고 하였다.⁶⁾ SundBerg는 남성 성악가에서 후두를 아래로 내림으로서 2.800kHz대에 singing formant가 높은 에너지로 형성된다고 하였고, vocal tract에 대한 음향학적인 모델을 통해서 세 가지 조건에서 극점을 만들 수 있고 제시하였다.⁷⁾

후두 위치의 조절은 음향학적으로나 발성적으로나 중요한 기술인데 SundBerg는 인두(pharynx)의 단면적이 후두 관(larynx tube)의 단면적보다 최소 6배 이상 넓어야 한다고 제안하였다. 이런 선행 연구들은 성도의 길이를 적당하게 조절하는 것은 중요한 발성훈련의 한 방법인 것으로 생각된다. 그렇다면 후두위치의 변화에 의한 공명장의 변화는 Singer’s Formant의 형성뿐만 아니라 다른 부분에도 영향을 미치지 않을까 하는 의문을 갖게 된다. 저자들은 후두 위치가 높고 낮음에 따라 모음 별 기본주파수(F0 : fundamental frequency), 성대 접촉률(CQ : close quotient), 음의 강도(intensity), 성도의 길이(vocal tract length), 하

인두 관의 폭(width of pharynx tube), 성악가 음형대(singer’s formant) 및 음형대 주파수의 강도(level of formant frequency) 변화 등을 알아보려 한다.

대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상은 후두위치에 변화에 따른 차이를 측정하여야 하므로 후두 위치를 자유자재로 조절할 수 있고, 이탈리아에서 7년 동안 이탈리아 전통적인 발성을 공부하고 성악경력이 28년된 남성바리톤으로서 약 15년 정도의 성악 전공 대학생을 지도한 경험을 지니고 있는 사람 1명을 선정하였다.

2. 연구방법

1) 측정도구

(1) Doctor Speech를 이용한 음성검사

“아”, “에”, “이”, “오”, “우” 각 모음을 약 2초씩 성악적인 발성으로 연장발성을 할 때 Doctor Speech의 Real Analysis에서 LPC spectrum과 spectrogram으로 후두를 높이 있을 때와 후두를 내렸을 때의 음형대 주파수와(Formant Frequency)와 음형대 주파수의 강도(Level of Formant Frequency) 분석하였다.

(2) Video fluoroscopy 촬영

Doctor Speech로 음성을 녹음할 때 정면과 측면에서 fluoroscopy 촬영을 실시하였다.

(3) 전기성문파형검사(Eletroglottography)

Lx. Speech Studio(Larygography Ltd, London, UK)의 SPEAD(Speech Pattern Element Acquisition and Display) 프로그램으로 기본주파수(F0 : Fundamental frequency)와 소리의 강도(Intensity), 성대의 전체 진동주기 중 성대의 접촉시간의 비율인 성대접촉률(CQ : Close Quotient)을 측정하였다.

2) 측정방법

측정은 2번의 다른 측정도구와 측정방법을 이용하였다.

(1) 영동 세브란스 병원 진단 방사선과에서 앉은 자세로 피실험자의 20cm 전방에 마이크를 설치하고 pitch pipe로 F# 음을 설정 한 다음 후두 위치를 아래로 내린 다음 “아”, “에”, “이”, “오”, “우” 모음을 각 2초씩 성악적인 발성으로 소리를 낼 때 Doctor Speech의 Real Analyzer 음성을

녹음하여 분석하였다. 이때에 측면과 정면에서 Video fluoroscopy 촬영을 동시에 실시하였다. Video fluoroscopy 촬영 전에 정확한 성도길이와 폭을 측정하기 위해 경추(The cervical vertebral)와 후두부중간에 4cm 납을 부착한 다음 비랍액을 입술에 바르고 섭취하여 사진의 선명도를 증가시키도록 하였다. 반복하여 후두를 위로 올린 다음 같은 방법으로 검사를 실시하였다. 이때의 기본조건으로 후두의 높이에 관계 없이 가능한 한 같은 호흡압력을 유지하도록 하였다.

(2) 음성 크리닉에서 피실험자의 후두주위를 알코올 솜으로 닦은 다음 Lx. Speech Studio의 E.G.G 밴드를 후두부 주위에 부착하고 pitch pipe를 붙여서 F# 음을 선정한 후 후두를 하강한 다음 성악 발성적인 소리로 “아”, “에”, “이”, “오”, “우” 각각의 모음을 2초간 연장 발성한 후 측정하였다. 반복하여 후두를 상승시킨 후 같은 방법으로 측정하였다. 이때 호흡압력 역시 같은 호흡압력을 유지하도록 노력하였다.

(3) 성도길이와 인두 관 폭의 측정

성도길이의 측정은 측면에서 video fluoroscopy로 촬영한 화면을 Photo shop 5를 이용하여 경추와 후두부의 중간에 세로로 부착된 4cm짜리 납과 성도길이를 비율로 계산하였다. 성도길이의 측정은 윗입술과 아랫입술의 정 중앙에서 시작하여 마지막 어금니를 기준으로 한 경구개부분까지 측정하고 경구개에서 다시 사진상의 경추2번(C2) 끝까지 다시 경추 2번에서 성대까지의 거리를 측정하였다(Fig. 1).

성도의 가로 및 앞뒤 폭의 측정은 video fluoroscopy로 촬영한 정면(Fig. 2)과 측면사진(Fig. 3)에서 인두관의 폭을 측정하였는데 인두관중 이상와(piriform sinus)의 바로 위의 가장 넓은 부분을 측정하였으며, 성도길이의 계산과 같은 방법을 사용하여 계산하여 측면과 정면의 가로 폭을 추

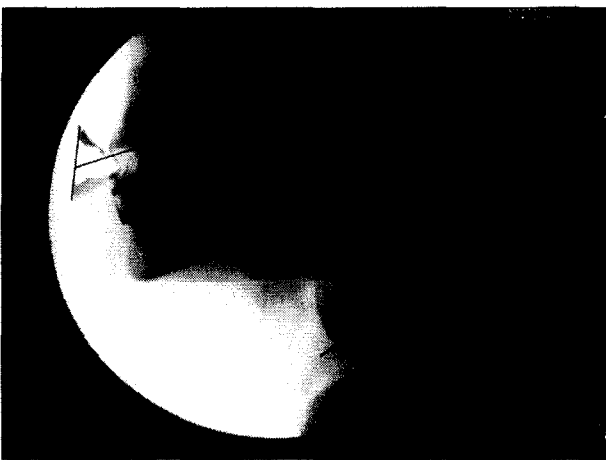


Fig. 1. The measurement of the length of vocal tract.

정하였다.

3. 결 과

1) 후두 위치에 따른 기본주파수, 성대접촉률, 음의 강도

후두위치의 변화에 따른 기본주파수는 후두가 내리고 발성했을 때나 후두를 올리고 발성했을 때나 거의 같은 기본주파수를 유지하였다. 그러나 성대접촉률은 후두가 아래로 내려 갔을 때 평균 약 $60.4 \pm 1.7\%$ 로 후두가 높이 있을 때보다 평균 약 $55.0 \pm 2.2\%$ 약 9.8%정도 증가하였다. 그리고 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때 평균 약 86.6 ± 1.1 dB로 후두가 올라갔을 때의 78.6 ± 2.7 dB보다 약 10%정도 증가한 것으로 나타났다(Table 1).

(1) /아/ 모음

후두위치의 변화에 따른 기본주파수의 변화는 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 178.8Hz로 후두가 올라갔을 때의

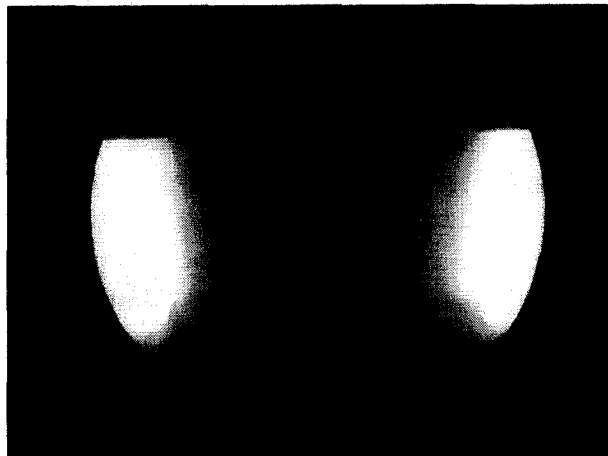


Fig. 2. The measurement of the length of the lateral width of the laryngeal tube.



Fig. 3. The measurement of the length of the anterior-posterior width of the laryngeal tube.

약 180.8Hz와 거의 차이가 없었다. 성대 접촉률은 후두가 아래로 내려갔을 때 평균 약 57.5%, 후두가 높이 있을 때의 약 55.0% 보다 약 2.5%정도 증가하였다. 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때 약 88.1dB로 후두가 올라갔을 때의 약 82.4dB보다 약 5.7dB정도 증가한 것으로 나타났다.

(2) /예/ 모음

/예/ 모음 기본주파수의 변화는 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 177.2Hz로 후두가 올라갔을 때의 약 177.7Hz와 차이가 없었다. 성대접촉률은 후두가 아래로 내려 갔을 때는 약 60.5%로 후두가 높이 있을 때의 약 54.4%보다 약 6.1%정도 증가하여 /아/ 모음 보다는 높게 나타났다. 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때는 약 86.1dB로 후두가 올라 갔을 때의 약 80.0dB보다 약 6.1dB정도 증가한 것으로 나타났다.

(3) /이/ 모음

/이/ 모음의 기본주파수의 변화는 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 181.5Hz이고 후두가 올라갔을 때는 약 178.5Hz여서 후두가 내려갔을 때와 거의 차이가 없었다. 성대접촉률은 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 61.1%로 후두가 높이 있을 때의 약 54.9%보다 약 6.2%정도 증가하여 비교적 많은 차이를 보였다. 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때 약 86.7dB로 후두가 올라 갔을 때의 약 78.7dB보다 약 8dB정도 증가하여 역시 비교적 많은 차이를 보였다.

(4) /오/ 모음

기본주파수의 변화는 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 179.5Hz로 후두가 올라갔을 때의 약 176.5Hz와 거의 같았다. 성대접촉률은 후두가 아래로 내려갔을 때 평균 약 61.8%로 후두가 높이 있을 때의 약 55.7%보다 약 6.1%정도 증가하여 비교적 많은 차이를 보였다. 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때 약 86.9dB로 후두가 올라갔을 때의 약 75.8 dB 보다 약 11.1dB정도 증가하여 가장 많은 차이를 보였다.

Table 1. Fundamental frequency, closed quotient and intensity difference between 'Low and high larynx'

Vowel	Low Larynx			High Larynx		
	F0 (Hz)	CQ (%)	Intensity (dB)	F0 (Hz)	CQ (%)	Intensity (dB)
아	178.8	57.5	88.1	180.8	55.0	82.4
예	177.2	60.5	86.1	177.7	54.4	80.0
이	181.5	61.1	86.7	178.5	54.9	78.7
오	179.5	61.8	86.9	176.5	55.7	75.8
우	177.9	61.2	85.0	179.5	57.5	76.3
Mean	178±1.7	60.4±1.7	86.6±1.1	178.6±1.6	55.0±2.2	78.6±2.7

(5) /우/ 모음

기본주파수의 변화는 후두가 아래로 내려갔을 때는 약 177.9Hz로 후두가 올라갔을 때의 약 179.5Hz와 거의 같았다. 성대접촉률은 후두가 아래로 내려갔을 때는 평균 약 61.2%로 후두가 높이 있을 때의 약 57.5%보다 약 3.7% 정도 증가하였다. 음의 강도 역시 후두가 내려갔을 때 약 85.0dB로 후두가 올라갔을 때의 약 76.3dB보다 약 8.7dB 정도 증가하여 비교적 많은 차이를 보였다.

2) 성도의 길이와 인두강의 가로 및 앞뒤 폭

(1) 성도의 길이 (Length of vocal tract : cm)

후두가 높을 때의 후두의 위치는 경추 4번(C4) 끝부분에 위치하였고 아래로 하강하여 발성할 때의 후두의 위치는 거의 경추 6, 7번(C7) 위치까지 하강하였다. 이때 모음마다 약간씩의 차이를 보였으나 거의 비슷한 위치를 유지하였다. 이때의 모음별 성도의 평균 길이는 약 20.7±0.6cm로 후두를 높이고 발성하였을 때의 길이인 약 18.3±0.9 cm보다 약 2.4cm정도 하향하여 약 13%정도 더 하강하였다(Table 2).

(2) 인두강의 가로 폭 (The anterior width of the pharyngeal tube : cm)

후두가 내려 갔을 때의 성도의 가로 폭은 모음에 따라 약간의 차이를 보였다. 그러나 그 차이는 아주 미미하였다. 정면에서 측정된 가로 폭은 평균 약 3.9±0.2cm로 후두가 올라갔을 때의 가로 폭인 3.5±0.2cm보다 약 0.4cm정도 넓어져 전체적으로 약 11%정도 넓어졌다(Table 3).

Table 2. Length of vocal tract difference between 'Low and high larynx'

Vowel	Low Larynx (cm)	High Larynx (cm)
아	21.4	18.9
예	20.2	17.5
이	20.0	17.3
오	20.8	19.0
우	20.0	19.0
Mean	20.7±0.6	18.3±0.9

Table 3. The Anterior-posterior width of the laryngeal tube difference between 'Low and high larynx'

Vowel	Low Larynx (cm)	High Larynx (cm)
아	3.9	3.6
예	4.3	3.4
이	3.7	3.6
오	4.0	3.8
우	3.8	3.7
Mean	3.9±0.2	3.5±0.2

(3) 인두강의 앞뒤 폭(The lateral width of the laryngeal tube : cm)

측면에서 촬영한 성도의 앞뒤 폭은 모음에 따라 차이는 거의 없었고 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 평균 약 1.68±0.05cm 후두가 위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭 평균 약 1.48±0.05cm보다 약 0.2cm정도 넓어져 평균 약 13% 정도 넓어지는 현상을 보였다(Table 4).

3) 모음 별 성도의 길이, 인두강의 가로 폭, 인두강의 앞뒤 폭

(1) /아/ 모음

후두가 내려갔을 때의 성도의 길이는 21.4cm로 후두를 높이하고 발성 하였을 때의 길이인 약 18.9cm보다 약 1.5cm정도 하향하였다.

후두가 아래로 내려갔을 때의 인두강의 가로 폭은 3.9cm로 후두가 올라갔을 때의 3.6cm보다 약 0.3cm정도 넓어졌다. 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 약 1.7cm 후두가

위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭인 약 1.5cm 보다 약 0.2cm정도 넓어지는 현상을 보였다(Fig. 4).

(2) /에/ 모음

후두가 내려갔을 때의 성도의 길이는 20.2cm로 후두를 높이하고 발성하였을 때의 길이인 약 17.5cm보다 약 2.7cm정도 하향하였다.

후두가 아래로 내려갔을 때의 인두강의 가로 폭은 4.3cm로 모음 중 가장 넓게 나타났으며 후두가 올라갔을 때의 3.9cm보다 약 0.5cm정도 넓어져 가장 큰 차이를 보였다. 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 약 1.7cm 후두가 위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭인 약 1.4cm보다 약 0.3cm정도 넓어지는 현상을 보였다(Fig. 5).

(3) /이/ 모음

후두가 내려갔을 때의 성도의 길이는 20.0cm로 후두를 높이하고 발성하였을 때의 길이인 약 17.3cm보다 약 2.7cm정도 하향하였다. 후두가 아래로 내려갔을 때의 인두강의 가로 폭은 3.7cm로 후두가 올라갔을 때의 3.6cm보다 약 0.1cm정도 넓어졌다. 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 약 1.6cm 후두가 위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭인 약 1.5cm보다 약 0.1cm정도 넓어지는 현상을 보였다(Fig. 6).

(4) /오/ 모음

후두가 내려갔을 때의 성도의 길이는 20.8cm로 후두를 높이하고 발성하였을 때의 길이인 약 19.0cm보다 약 1.8

Table 4. The lateral width of the laryngeal tube between 'Low and high larynx'

Vowel	Low Larynx(cm)	High Larynx(cm)
아	1.7	1.5
에	1.7	1.4
이	1.6	1.5
오	1.7	1.5
우	1.7	1.5
Mean	1.68±0.05	1.48±0.05

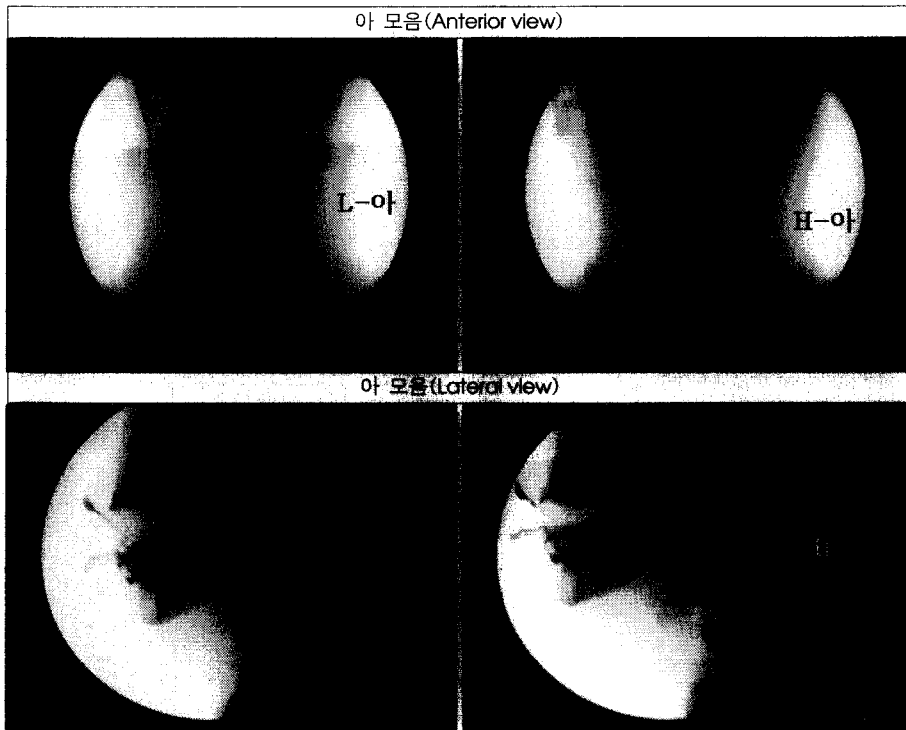


Fig. 4. /a/ vowel in the video fluoroscopy.

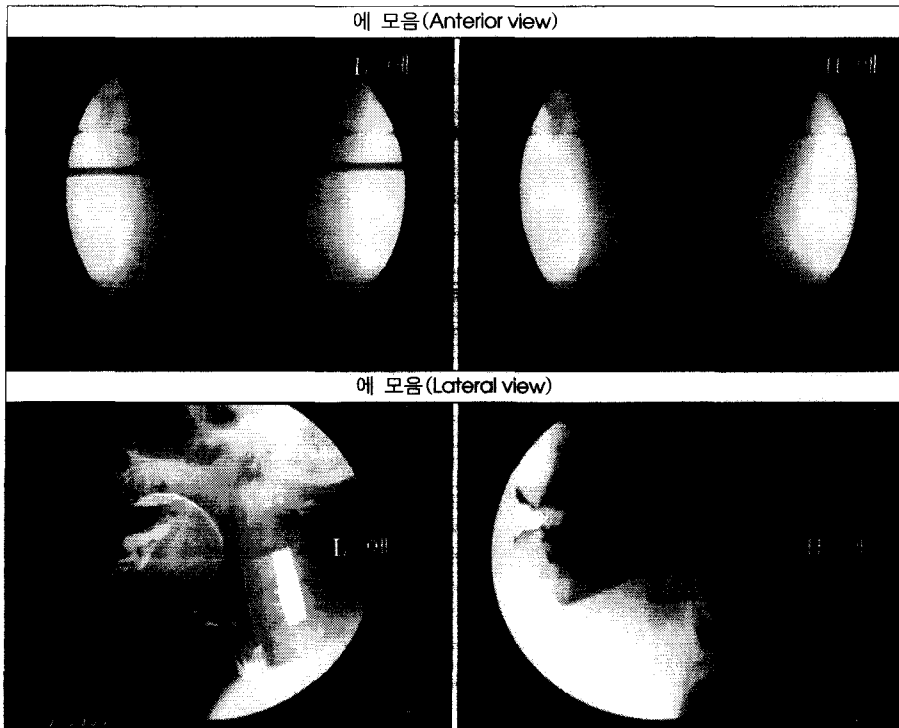


Fig. 5. /e/ vowel in the video fluoroscopy.

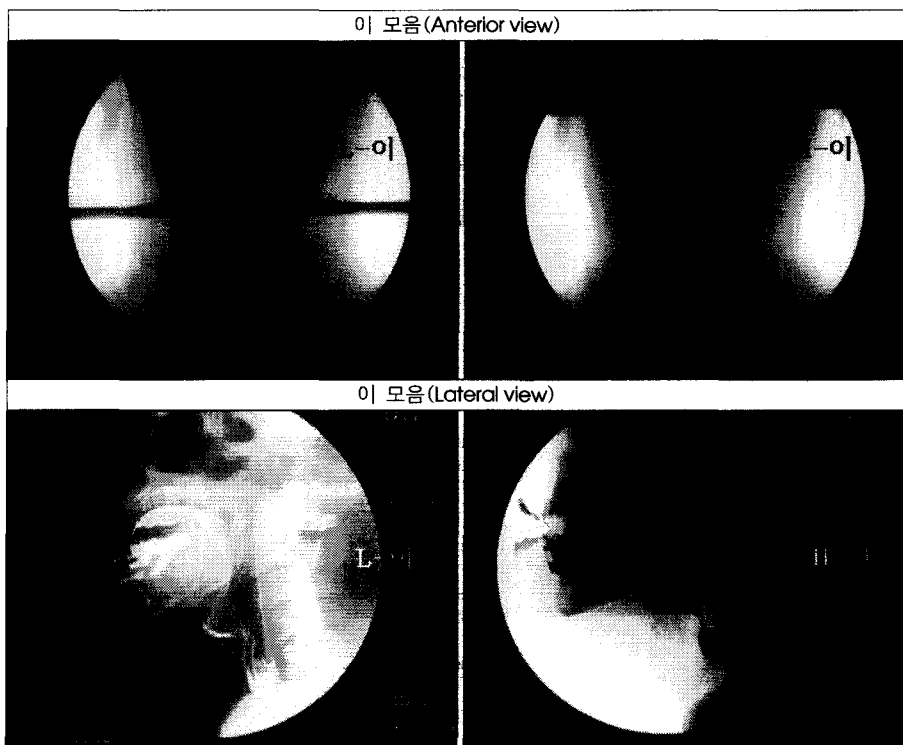


Fig. 6. /i/ vowel in the video fluoroscopy.

cm정도 하향하였다. 후두가 아래로 내려갔을 때의 인두강의 가로 폭은 4.0cm로 후두가 올라갔을 때의 3.8cm보다 약 0.2cm 정도 넓어졌다. 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 약 1.7cm 후두가 위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭인 약 1.5cm 보다 약 0.2cm정도 넓어지는 현상을 보였다(Fig. 7).

(5) /우/ 모음

후두가 내려갔을 때의 성도의 길이는 20.0cm로 후두를 높이하고 발성하였을 때의 길이인 약 19.0cm보다 약 1.0cm정도로 가장 적게 하향하였다.

후두가 아래로 내려갔을 때의 인두강의 가로 폭은 3.8

cm로 후두가 올라갔을 때의 3.7cm보다 약 0.1cm 정도 넓어졌다. 후두가 내려갔을 때의 앞뒤 폭은 약 1.7cm 후두가 위로 올라갔을 때의 성도의 앞뒤 폭인 약 1.5cm 보다 약 0.2cm 정도 넓어지는 현상을 보였다(Fig. 8).

4) 후두위치에 따른 공명주파수 및 공명주파수 강도

후두를 내리고 발성했을 때는 F3, F4, F5에서는 공명주파수가 서로 가까워지면서 밀집된 형태의 공명주파수를 이루었고 공명주파수의 강도는 강한 에너지가 고주파에서도 유지되어 강한 에너지를 가진 성악가 음형대가 형성하였다.



Fig. 7. /o/ vowel in the video fluoroscopy.



Fig. 8. /u/ vowel in the video fluoroscopy.

후두를 올리고 발성하였을 때는 F3, F4, F5가 분리되는 형태를 이루었고 공명주파수의 강도가 후두를 내리고 발성했을 때보다 낮은 에너지를 가지고 있었으나 성악가 음형대는 형성되었다. 후두 위치에 따른 공명주파수의 변화는 후두가 하강하였을 때의 F3는 /에/ 모음을 제외하고 모든 모음에서는 전부 2432Hz의 공명주파수를 보였다. 공명주파수의 강도는 큰 차이를 보이지 않고 전체 평균 약 58.4±3.5dB를 보였다. /에/ 모음의 F3에서는 2200Hz대로 다른 모음의 평균 주파수보다 200Hz정도 낮게 나타났으나 공명주파수의 강도는 59dB로 다른 모음의 공명주파수의 강도와 거의 같았다. 반면 후두가 올라갔을 때의 F3는 2500~2700Hz대에서 형성되어 후두가 내려갔을 때 보다 높은 공명주파수를 보였다. 그러나 후두를 내리고 발성할 때보다 공명주파수의 강도는 47.4±2.5dB로 약 23%정도 약해지는 경향을 나타냈다. 후두를 내려서 발성했을 때의 F4는 약 2550~2650Hz에서 평균 약 57dB의 공명주파수의 강도를 나타냈다. 반면 후두를 올리고 발성했을 때는 3400~3700Hz대에서 F3를 보여 후두를 하강하고 발성했을 때보다 약 1000Hz정도 높은 공명주파수를 나타냈으나 강도는 평균 약 44.3±6.7dB로 약 29% 감소하는 경향을 보였다.

F5는 후두를 내리고 발성했을 때는 모든 모음에서 3400Hz대의 공명주파수를 나타냈고 공명주파수의 강도는 /오/ 모음에서만 약 22dB 급격히 감소하는 경향을 보였으나 다른 모음은 평균 49dB을 유지하였다. 반면 후두를 올리고 발성했을 때 아, 에, /이/ 모음에서는 F5가 나타나지 않았다. /오/ 모음에서는 3700Hz대에서 공명주파수가 약 28dB의 공명주파수의 강도를 보였고, /우/ 모음에서는 4500Hz대에서 모음에서는 약 21dB의 공명주파수의 강도를 나타

내었다(Table 5).

5) 모음 별 공명주파수 및 공명주파수 강도

(1) /아/ 모음

/아/ 모음에서 후두가 내려갔을 때의 F1은 645Hz이고 F2는 893Hz로 248Hz정도 높아졌다, 그러나 후두가 높이 있을 때는 731Hz(F1)에서 1227Hz(F2)로 약 496Hz로 F1에서 F2의 주파수 증가율이 약 2배정도 높게 나타났다. F3, F4가 밀집형태로 나타났으며 공명주파수의 강도가 F2에서 증가한 후 공명주파수가 고주파수로 올라가도 공명주파수의 강도는 조금씩 밖에 떨어지지 않았다. F3는 후두가 내려갔을 때는 2432Hz로 후두가 올라갔을 때의 2852Hz보다 420Hz 정도 낮았다. 이때 후두가 내려갔을 때의 공명주파수의 강도는 60dB였고, 후두가 높이 있을 때는 45dB로 후두를 낮게 하고 발성했을 때가 15dB정도 높게 유지되어 공명주파수가 높아져도 공명주파수의 강도는 별로

Table 5. Formant frequency between 'Low and high larynx'

	Vowel	Formant frequency(Hz)				
		F1	F2	F3	F4	F5
Low larynx	아	645(59)	893(68)	2432(60)	2650(57)	3454(51)
	에	516(59)	1248(63)	2217(59)	2572(59)	3422(49)
	이	365(62)	1582(52)	2421(56)	2636(57)	3433(48)
	오	398(57)	753(63)	2432(54)	2561(55)	3444(22)
	우	387(60)	753(62)	2432(63)	2561(57)	3444(48)
High larynx	아	731(61)	1227(63)	2852(45)	3498(42)	
	에	398(57)	1948(51)	2507(51)	3465(42)	
	이	387(53)	2120(52)	2604(48)	3594(39)	
	오	538(61)	914(57)	2712(45)	3024(39)	3713(28)
	우	516(53)	925(40)	2755(48)	3777(26)	4509(21)

* () : Level of formant frequency (dB)

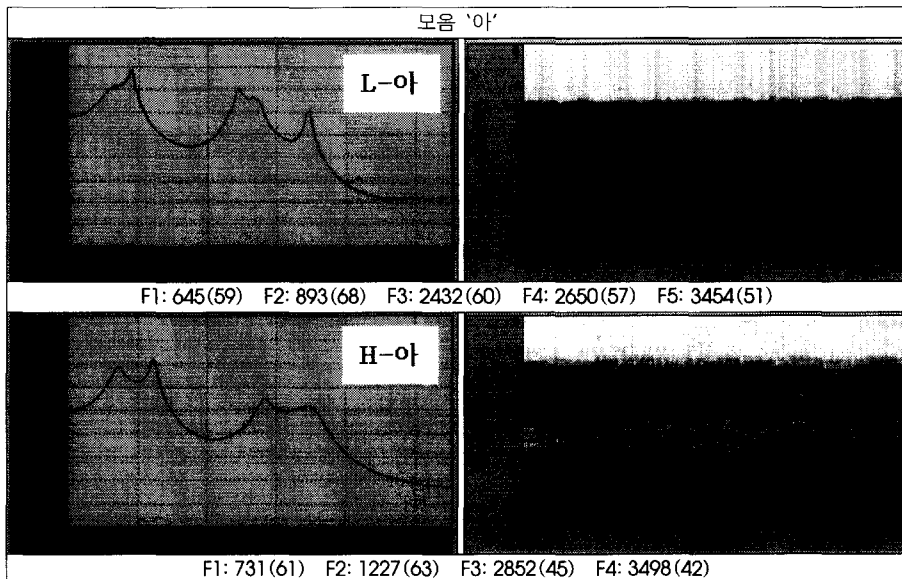


Fig. 9. LPC Spectrum & Spectrogram of /a/ vowel. () : Level of formant frequency, L : Low, H : High.

떨어지지 않고 유지되는 현상을 보였다. 후두가 내려갔을 때의 F4는 2650Hz로 후두가 올라갔을 때의 3498Hz보다 848Hz 정도 낮게 나타났다. 그러나 후두가 내려갔을 때의 공명주파수의 강도는 57dB로 높이 있을 때의 42dB보다 15dB정도 강하게 나타났으며, F3의 공명주파수의 강도와 같이 고주파수로 올라가도 공명주파수의 강도는 별로 떨어지지 않고 유지되는 현상을 보였다. F5는 후두가 내려갔을 때는 3454Hz이고 공명주파수의 강도는 51dB로 나타나서 역시 공명주파수가 고주파수로 올라가도 공명주파수의 강도는 크게 떨어지지 않았다(Fig. 9).

(2) /에/ 모음

후두가 내려갔을 때의 F1은 516Hz이고 F2는 1248Hz였다. 그리고 후두가 올라갔을 때는 F1은 398Hz, F2는 1948Hz로 후두가 내려갔을 때와 높이 있을 때의 F1과 F2 사이의 공명주파수의 간격이 2배정도 차이가 나서 /아/ 모음과 같은 현상을 보였다. 후두의 위치가 내려갔을 때 F3는 /에/ 모음에서만 2217Hz로 다른 모음의 F3의 평균 2432Hz보다 200Hz정도 낮게 나타났다. 그러나 공명주파수의 강도는 59dB를 보여 다른 모음과 차이를 보이지 않았고, 후두가 올라갔을 때의 제 F3 2507Hz대에서 형성되어 후두가 내려갔을 때 보다 높은 공명주파수를 보였으나 51dB로 후두를 내리서 발생할 때보다는 8dB정도 감소하였다(Fig. 10).

(3) /이/ 모음

후두를 내렸을 때 F1(365Hz)과 높이 했을 때의 F1(387Hz)은 22Hz 정도 차이를 보였다. F2는 후두를 내렸을 때

(1587Hz)와 높이 했을 때 (2120Hz)의 공명주파수의 차이는 538Hz정도 차이가 났고 후두를 내리고 발생했을 때의 F1과 F2사이의 공명주파수의 차이는 1217Hz이고 후두를 올리고 발생했을 때의 F1과 F2의 공명주파수의 차이는 1733Hz로 516Hz 차이를 나타냈다. 그러나 F3는 후두를 내리고 발생했을 때는 2421Hz로 후두를 올리고 발생했을 때의 2604Hz와 183Hz정도 차이를 보여 큰 차이를 보이지 않았으나 공명주파수의 강도는 후두를 내리고 발생했을 때가 12dB 정도 높게 나타났다. 후두를 내리고 발생했을 때의 F4는 약 2636Hz로 나타나서 F3와 근접하여 포만트가 밀집되는 현상을 보였다. 반면 후두를 올리고 발생했을 때는 3594Hz로 보여 F3와 F4사이가 후두를 내리고 발생했을 때 보다 공명주파수사이가 멀어지는 현상을 보였다. 그러나 후두가 내려갔을 때의 공명주파수의 강도는 약 59dB로 후두가 높이 있을 때의 39dB보다 강한 에너지를 유지하고 있었다. F5는 후두를 내리고 발생했을 때의 공명주파수는 3433Hz를 나타냈고 공명주파수의 강도는 48dB로 감소하는 경향을 보였으나 후두를 올리고 발생했을 때는 F5가 보이지 않았다(Fig. 11).

(4) /오/ 모음

후두를 내리고 발생했을 때의 F1은 398Hz이고 F2는 753Hz로 후두를 올리고 발생했을 때의 F1인 538Hz와 F2의 914Hz와 큰 차이가 없었다. 그러나 다른 모음들과는 달리 /오/ 모음에서는 후두를 내리고 발생했을 때의 F3는 2432Hz(54dB), F4는 2561Hz(55dB), F5는 3444Hz(22dB)로 밀집 형태를 보였고 후두를 올리고 발생했을 때

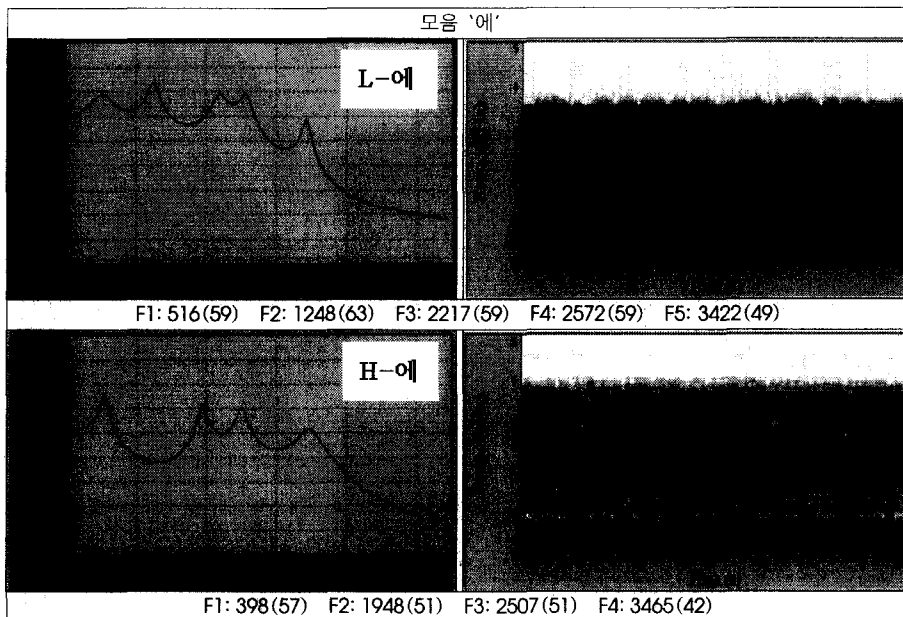


Fig. 10. LPC spectrum & spectrogram of /e/ vowel. () : Level of formant frequency, L : Low, H : High.

F3는 2712Hz, F4는 3024Hz, F5는 3713Hz를 나타내서 후두를 내리고 발성했을 때보다는 넓은 형태로 보이는 현상을 나타냈다. 그리고 F3의 공명주파수의 강도는 45dB, F4는 39dB, F5의 28dB로 후두를 내리고 발성했을 때의 F3는 54dB, F4는 55dB, F5는 22dB보다는 약한 에너지를 가지고 있었다. 그리고 F5의 공명주파수의 강도가 다른 모음과 달리 급격히 감소하였다(Fig. 12).

(5) /우/ 모음

후두를 내리고 발성했을 때의 F1은 387Hz이고 F2는 753Hz로 후두를 올리고 발성했을 때의 F1(516Hz)와 F2

(925Hz)는 큰 차이가 없었다. 후두를 내리고 발성했을 때의 F3(2432Hz), F4(2561Hz), F5(3444Hz)로 역시 밀집된 공명주파수를 나타냈으며 후두를 내리고 발성했을 때의 /오/ 모음과 주파수가 F1을 제외하고는 거의 일치하는 현상을 보였다. 그러나 공명주파수의 강도는 서로 다르게 나타났다. 그리고 후두를 올리고 발성했을 때는 F3은 2755Hz, F4는 3777Hz, F5는 4509Hz로 후두를 내리고 발성했을 때보다는 넓은 형태의 음형대를 보였다. 그리고 역시 후두를 내리고 발성했을 때의 F3의 공명주파수의 강도는 63dB, F4는 57dB, F5는 48dB를 나타냈고 후두를 올리

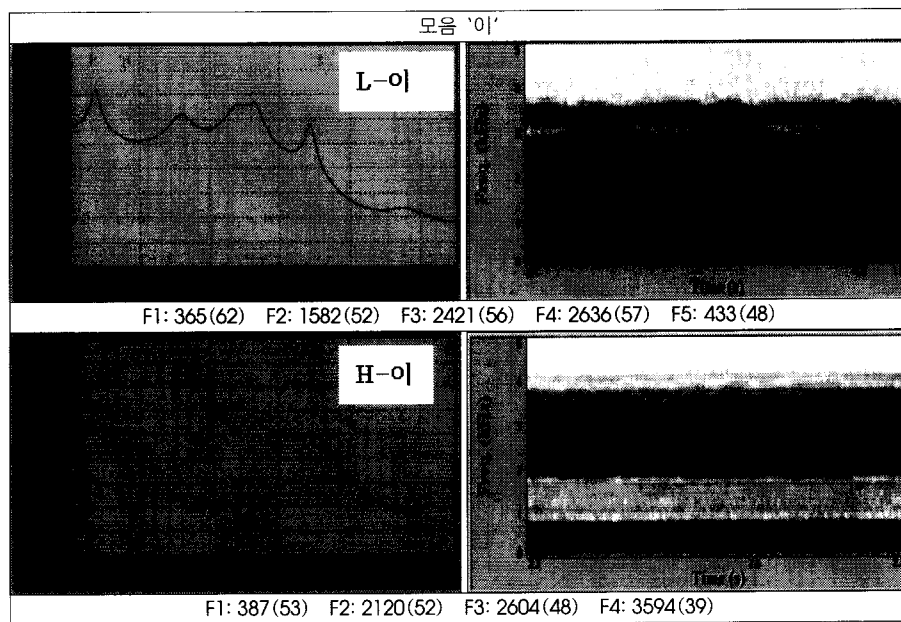


Fig. 11. LPC spectrum & spectrogram of /i/ vowel. () : Level of formant frequency, L : Low, H : High.

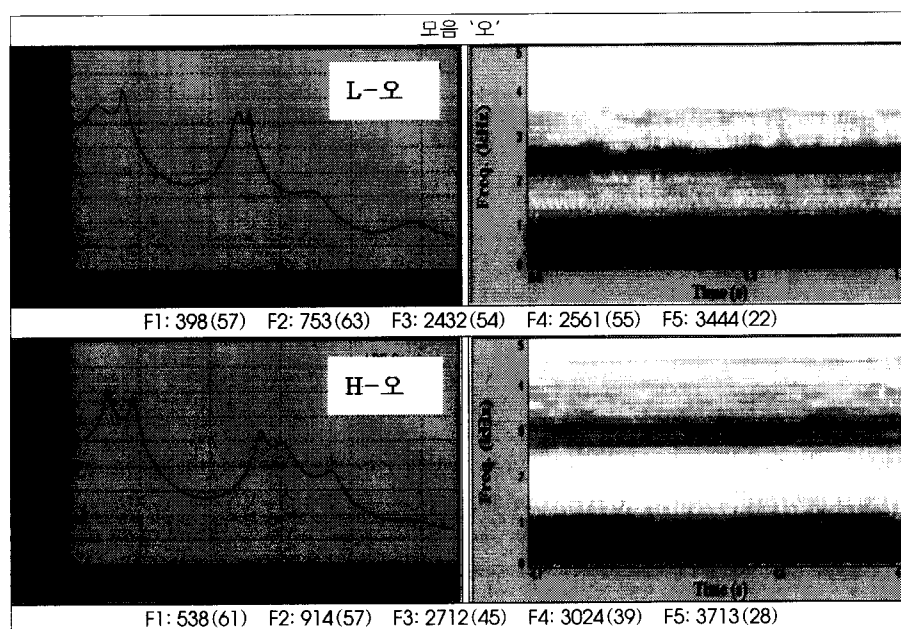


Fig. 12. LPC spectrum & spectrogram /o/ vowel. () : Level of formant frequency, L : Low, H : High.

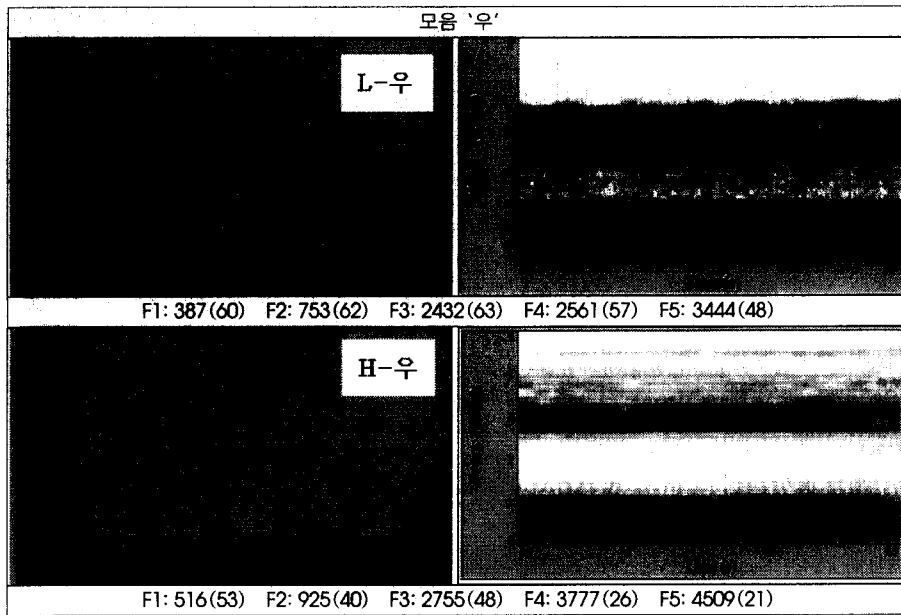


Fig. 13. LPC spectrum & spectrogram of /u/ vowel. () : Level of formant frequency, L : Low, H : High.

고 발생했을 때는 F3의 공명주파수의 강도는 48dB, F4는 26dB, F5는 21dB로 낮게 나타났다(Fig. 13).

고 찰

Source-filter 이론에서는 성대원음은 성도모양의 변화에 의하여 공명주파수의 변화로 나타나며, 성도를 통과하는 과정에서 특정주파수가 강화되는 현상을 나타낸다. 이러한 변화를 상 인두 및 구강 혀와 입술모양에 의하여 공명주파수의 변화를 가져오고 서로 다른 음질의 소리가 생성되는 것이다. 그러나 성도의 모양과 성대원음과는 중요한 상호관계가 있다. 최근의 연구에 의하면 성대의 적당한 조절과 후두가 하강하였을 때 경제적이며 음성의 효율을 극대화시킬 수 있다고 보고하고 있다.⁸⁾⁹⁾

아무리 최적의 조건의 성도를 갖고 있더라도 성대에서 좋은 성대원음을 만들지 않는다면 좋은 목소리가 생산되지는 않을 것이다. 좋은 성대 원음이란 충분한 성대접촉과 충분한 호흡의 뒤 받침으로 이루어지는 것은 명백하다. 실제로 이탈리아 발성에서는 후두를 아래로 하강하는 발성훈련을 하고 있는데 이는 음향학적인 이유인 singer's formant를 형성하기 위한 목적이라기 보다는 성대의 접촉을 강화하는 방법으로 더 쓰여지고 있다. 또한 발성치료의 한 기법으로 후두를 하강하여 성대의 접촉이 잘 되지 않는 경미한 성대구증(sulcus vocalis), 성대 결절(nodule)부위가 작은 경우, 또는 결절의 돌출부위만 집중적으로 접촉하는 경우, posterior chink가 있는 음성 질환자 등에게 성대접촉률을 증가시키기 위한 방법으로 사용되고 있다. 이번 연구에서 후두

의 위치를 조절하여 발생하여 기본주파수, 성대접촉률, 음의 강도 등을 측정한 결과기본주파수는 후두의 높이에 관계 없이 일정하였다. 그러나 성대접촉률은 후두가 아래로 내려갔을 때가 후두가 높이 있을 때 보다 약 9.8%정도 증가한 것으로 나타났고 음의 강도는 약 10%정도 증가한 것으로 나타났다. Titze에 의하면 후두가 내려가면 성대는 두꺼워진다고 하는데, 이것은 단순히 전체 후두가 내려앉았을 때 후두 안쪽의 조직이 기관 점막(tracheal mucosa)에 대하여 다발로 묶여 주름을 잡으려는 경향이 있다는 사실에 기인한 것이고, 반대로 후두가 올라갈 때는 후두 안쪽의 조직이 기관의 잡아당김(tracheal pull)에 의해 세로로 뻗으려는 경향이 있어 더 얇은 구조를 만든다고 한다. 이런 경우 성대가 두꺼워지면 강한 소리를 만들 수 있는 가능성이 더 크다. 왜냐하면 가운데 부분의 표면이 접촉해서 견고한 성문의 폐쇄(glottal closure)를 만들 수 있는 기회가 더 많기 때문이며, 이것은 공기의 흐름을 효과적으로 가로막아 큰 편차를 만들고 같은 호흡압력으로 이 둘은 음의 강도가 증가하는 역할을 하기 때문이라 하였다.¹⁰⁾ 그러나 후두가 높게 위치하여 발생한 경우도 평균 55.0%로 비교적 높게 나타났는데 남성성악가의 경우 훈련기간이 길수록 성대접촉률이 높게 나타난다고 보고하고 있다.¹¹⁾

성도의 길이는 각 모음 별 평균 약 20.7±0.6cm로 후두를 높이하고 발생하였을 때의 길이인 약18.3±0.9cm보다 약 2.4cm정도 하향하여 약 13%정도 더 길어졌다. Dimitriev와 Kiselev의 등의 연구에서는 바리톤의 경우 21.5~24cm로 본 피실험자의 성도의 길이보다 약간 높게 나타났는데 이런 차이는 인종에 따라 다르거나 측정방법의 차

이 때문이라 생각된다.¹²⁾

/아/ 모음의 길이가 다른 모음의 평균 길이보다 약0.7cm 정도 길게 측정 되었는데 그 이유는 /아/ 모음을 발음할 때 입이 크게 벌어지기 때문에 성도의 길이측정을 할 때 입술과 입술사이의 중앙에서 시작하였기 때문이라 생각된다. 또한 모음에 따라 후두가 변하며 그것은 성대의 진동에 영향을 준다고 하며, 모음 중 입술을 모으는 원순 모음일 때 성도의 길이가 가장 길어진다고 한다.¹³⁾

후두를 하강하여 발성했을 때 /아/ 모음을 제외한 성도의 길이가 거의 변화가 없었는데 발성 시 모음이 변화하여도 후두의 위치 변화가 적을수록 가창 시 일정한 음질의 소리를 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 후두를 높게 하여 발성하였을 때는 모음마다 약간씩 성도의 길이가 변화되었다. 성도의 가로 폭을 측정한 결과 후두를 하강하였을 때는 평균 약 3.9 ± 0.2 cm로 후두를 올리고 발성했을 때보다 보다 폭이 11%정도 증가하였고 후두를 내렸을 때의 인두강의 앞뒤의 폭은 평균 1.68cm로 후두를 올렸을 때보다 약 16% 정도 넓어졌다. 그러나 가로 폭보다 앞뒤 폭이 좁게 나타났는데, 이것은 원래 측정 부위의 인두강이 타원을 이루고 있거나, 앞 뒤 폭의 측정 부위가 좁은 곳을 측정하였거나, 측정사진의 선명도가 떨어져 측정의 오류가 있었거나, 등을 추정할 수 있는데 후두를 내렸을 때의 폭이 후두를 올렸을 때의 폭과 일정하게 차이를 나타내서 측정한 부분이 타원을 이루고 있는 것으로 추정된다. 이렇게 넓어진 인두는 적어도 3가지 특징을 이룬다고 한다. 첫째로 낮은 F1만든다, 같은 성도의 길이의 단일 관에서는 인두를 넓혔을 때 후두관(epilaryngeal tube)보다 넓어지고 확장된 구강 부분보다는 좁아지면 낮은 제 1 공명 주파수를 만든다고 한다. 이와 같이 낮은 주파수는 성도에서 어둡고 강한 소리의 특징을 만들고 더 강조된다. 그러나 넓혀진 인두는 모음인지의 변화를 가져올 수도 있다. 두 번째로 넓혀진 인두는 후두관이 좁은 상태를 유지한 조건에서는 singer's formant를 증폭시킨다. SundBerg는 만약 후두관의 좁힘을 유지하지 않으면, 그와 같은 소리는 오페라에서 요구되는 적절한 공명이 부족한 소리로 바람이나 파도 소리와 같은 소리가 될 것이라고 말했다. 세 번째 넓어진 인두는 변화하는 모음이 영향으로부터 성대의 음향학적 분리를 이루게 한다. 모의 실험에서는 이것이 유지될 때, 음원 파형이 더 안정적이었음을 보여준다. 결론적으로 후두관과 성문은 트럼펫의 마우스피스와 입술처럼 같은 역할을 하는 음향학적 단위가 된다고 한다.¹⁴⁾¹⁵⁾ 후두를 내리고 발성했을 때의 공명주파수는 대체로 후두를 올리고 발성했을 때 보다 높은 공명주파수를 나타내고 있다. 후두를 내리고 발성했을 때는 F1, 과

F2는 모음의 특징을 구분하는 가장 중요한 공명주파수이다. 섭동 이론(Perturbation theory)을 통하여 성도의 특정 위치의 협착을 통하여 공명주파수의 조정이 가능함을 알 수 있다. F1은 혀의 높이(tongue height)와 반비례의 관계를 갖고 있고, F2는 혀의 전진(tongue advancement)과 비례 관계가 있다.¹⁶⁾ 이를 토대로 후두위치에 따른 F1을 비교하여 보면 /아/ 모음에서 후두를 내렸을 때(F1 : 645Hz)의 혀의 높이는 후두를 올렸을 때(F1 : 731Hz)의 혀의 높이 보다는 올라갔기 때문에 공명주파수가 더 낮게 나타나서 Fig. 6의 그림과 일치하였다. /에/ 모음에서는 후두를 내리고 발성했을 때의 F1(516Hz)이 후두를 올리고 발성했을 때의 F1(398Hz)보다 높아 혀의 높이가 아래로 내려갔을 것으로 예상되나 Fig. 7의 혀의 위치와는 다른 양상을 나타내었다. 그러나 이는 입의 벌림에 의하여 혀의 높이는 입천장과 거리의 영향을 받는 것과 관련이 있는 것으로 추정된다. Borden등은 모음 사각도에 있어서 모음 위치에 대한 조음적 변수와 음향학적 산출과의 관계는 일반적으로 입술의 내뺌 정도(protrusion)와 혀의 후진(retraction)등에 의해 구강의 커짐에 따라 F2가 작아진다고 하였고 인두강의 크기가 감소함에 따라 혀의 위치가 낮아지고 입을 여는 정도에 따라 증가하기 때문에 F1이 증가한다고 하였다. 그러나 음향학적으로 결정적인 차원은 구강이며 혀의 위치나 입술의 내뺌 정도는 보충적인 역할을 하는 것이라 하였다.¹⁷⁾ /이/ 모음의 F2를 섭동이론으로 설명하면 혀의 전진과 반비례하므로 후두를 내렸을 때의 F2(1248Hz)보다 후두를 올렸을 때 F2(1948Hz)가 높게 나타나서 후두를 올렸을 때의 혀의 전진이 많았음을 알 수 있어 Fig. 8과 일치하였다. 또한 다른 모음의 경우도 일치하였다. 또한 후두를 내리서 발성 하였을 때는 음형대 사이의 주파수 차이가 좁아지면 이들의 진폭이 증가한다고 하는데 이번 결과도 비슷하게 나타났다. van den Berg 와 Vennard의 연구에 의하면 어두운 음색의 베이스 와 가벼운 음색의 베이스 중에 어두운 음색을 가지고 있는 베이스에서 singer's formant가 낮은 것으로 보고하고 있는데,¹⁸⁾ 이번 연구에서 낮은 주파수대의 성악가 음형대 주파수를 보였다. 후두를 내리고 발성했을 때의 F3는 /에/ 모음을 제외하고는 2400Hz대에서 형성되었고 F4는 2500~2600Hz에서 형성되어 아주 가까운 주파수대를 형성하여 밀집된 형태를 보였다. 또한 F5도 3400Hz대에서 형성되어 주파수가 모이는 현상을 나타내었다 이렇게 주파대가 모이면 강한 에너지를 갖게 된다고 하고 이번 연구에서도 같은 결과를 나타내었다. 그리고 후두를 내리고 발성했을 때는 F3에서 F4, F5로 주파수가 고 주파수로 가도 후두를 올리고 발성했을 때 보다 공명주파

수의 강도의 감소 폭이 훨씬 낮았다. 후두를 올리고 발성했을 때도 F3, F4, F5에서 나름대로 공명주파수의 강도가 어느 정도 형성되었고 성악가 음형대도 형성되었다. 그러나 후두를 내리고 발성했을 때처럼 F3, F4, F5가 밀집 형태를 가지고 있지는 않았다. 이처럼 포만트가 밀집형태를 이루어 마치 하나의 공명 주파수처럼 모이는 현상을 나타내면 특히 F3, F4에서 LFF는 떨어지지 않고 고주파에서도 유지 되는 것으로 생각된다. 이것은 성악가 음형대의 특징적인 형태의 하나이며, SundBerg는 성악가에서 음의 강도가 10dB 증가하면 성악가 음형대의 강도가 16dB정도 증가한다고 하였는데,¹⁹⁾ 이번 연구에서도 후두를 내렸을 때의 공명주파수의 강도가 후두를 올렸을 때보다 높게 나타난 원인 중에 하나로 소리의 강도가 8dB정도 증가한 것이 원인 중에 하나인 것으로 생각된다. SundBerg는 이러한 성악가 음형대를 만들기 위해서는 아래와 같은 세가지 조건을 제시하였다. 첫째, 인두(pharynx)의 단면적이 후두관(larynx tube)의 단면적보다 최소 6배 이상 넓어야 한다. 그러게 되면 후두관은 성도의 나머지 부분과 음향학적으로 결합되지 않고, 성도의 전이기능(transfer function)이 새로운 포만트를 추가하게 된다. 두 번째 후두실(ventricle)은 인두관의 나머지와 비교해서 넓어야 하며, 추가된 포만트의 주파수 값은 이렇게 함으로써 정상적인 말에 있는 3번째, 4번째 포만트의 주파수 사이에 그 값을 가진다고 하였다. 세 번째 이상와(piriform sinus)가 넓어져야 다섯 번째 포만트의 주파수가 거의 3kHz로 감소된다고 하였다. 그의 연구에서 후두가 내려갔을 때 이러한 현상이 나타난다고 하였다. 또한 F4는 후두실(ventricle)에 영향을 받고 F5는 이상와에 영향을 받는다고 하였으며 이상와는 공명효과를 감소시킨다고 하였다.⁷⁾ 이것은 Fant에 의하여 증명되었는데 그는 성도에 대한 아나로그 전기실험에서 후두실이 F4에 중요한 역할을 하는 것을 증명하였고, 인두의 길이는 이상와에 영향을 끼친다고 하였다. 또한 이상와의 주머니는 5 kHz 근처의 주파수를 차단하는 것을 발견하였다.²⁰⁾ 또한 Dang과 Seikacho의하면 그들은 천천히 이상와에 물을 쏟아 부으면서 점차적으로 채웠다. 공명현상의 결과지들을 음향학적으로 제거함으로써 3kHz영역 내에서의 스펙트럼이 강화되었다. 즉 높은 레벨의 음향 에너지는 결과지들이 채워졌을 때 만들어졌다. 이것은 결과지들이 음향에너지를 더 생성하는 것이 아니라 그 에너지를 가져가고 있다는 것을 증명하였다.²¹⁾ 결국 좋은 공명 에너지를 얻기 위해선 이상와의 공간을 줄이는 것이 좋은 발성이 되는 것인데 이때가 후두를 내렸을 때라고 하였다. 이번 연구에서도 후두를 내렸을 때 성도의 길이가 길어지고 인두 관의 폭이 넓어지고

F5가 3kHz대로 내려와 형성되었으나 후두를 올리고 발성했을 때는 /아/, /에/, /이/ 모음에선 F5가 보이지 않았는데 그 이유는 포만트 측정의 폭이 5kHz로 제한하였기에 그 이상의 주파수대에서 제 5 포만트가 나타난 것으로 예상할 수 있다. 이것은 위에서 SundBerg가 제시한 성악가 음형대 형성의 세 가지조건 중 이상와가 넓어졌을 때 F5가 3kHz대까지 내려온다고 하였는데 후두를 올렸을 때는 이상와가 넓어지지 않아 5kHz 이상의 주파수대를 나타냈을 것으로 예상할 수 있을 것이다.

결론

후두를 아래로 내리고 발성하면 후두를 올리고 발성했을 때보다 성대접촉률, 음의 강도 등이 증가하며 성악가 음형대가 2400~2600Hz에서 제 3 포만트와 제 4 포만트가 형성됐고 제 5 포만트는 3400Hz에서 나타나서 밀집되는 현상을 나타냈다. 또한 공명주파수의 강도 역시 높게 나타났으며 고주파수대로 올라가도 공명 주파수의 강도가 별로 떨어지지 않았다. 후두를 올리고 발성했을 때도 성악가 음형대가 형성되었으나 모든 부분에서 후두를 내리고 발성했을 때 보다는 낮은 현상을 보였다.

중심 단어 : 후두위치 · 성대 접촉률 · 성도의 길이 · 공명주파수 강도 · 성악가음형대.

REFERENCES

- 1) Sundberg J. Formant structure and articulation of spoken and sung vowels. *Folia Phoniatr* 1970;22:28-48.
- 2) Bartholomew W J. A physical definition of "Good voice-quality" in male voice. *J Acoust Soc Am*:1934.
- 3) Titze IR. *Principles of Voice Production*, Allyn and Bacon, Needham Heights, Mass:1994. p.167.
- 4) Bloothoof G, Plomp R. Spectral analysis of sung vowel III. *J Acoust Soc Am* 1986;79:852-64.
- 5) Cleveland TF. Acoustic properties of voice timbre types and their influence on voice classification. *J Acoust Soc Am* 1977;61:622-9.
- 6) Schutte HK, Miller R. Resonance balance in register categories of the singing voice: a spectral analysis study. *Folia Phoniatr* 1984;36:289-95.
- 7) Sundberg J. Articulatory interpretation of the 'singing formant'. *J Acoust Soc Am* 1974;55:838-44.
- 8) Verdolini K, Druker D, Palmer P, Samawi H. Laryngeal adduction in resonant voice. *J Voice* 1994;12:315-27.
- 9) Titze IR. Regulating glottal airflow in phonation: application of the maximum power transfer theorem to a low dimensional phonation model. *J Acoust Soc Am* 2002;111 (1):367-76.
- 10) IR Titze. Raised versus Lowered Larynx Singing. *Science of Singing*: 1994.
- 11) Howard. DM. Variation of electrolaryngographically derived closes quotient For Trained and untrained adult female singers. *J Voice*: 1995. p 9.
- 12) Dmitriev L, Kiselev A. Relationship between the formant structure of

- Different Types of singing Voices and the Dimensions of Supraglottic Cavities. Folia phoniatr: 1979. p.31.*
- 13) Riordan CJ. *Control of vocal-tract in speech. J Acoust soc Am 1977; 62 (4):998-1002.*
 - 14) SundBerg, J. "Acoustics of the singing voice" *Scientific America 1977;3:236.*
 - 15) Titze IR, Story B. *Acoustic interaction of the voice with the lower vocal tract. J Acoust Soc Am 1977;101 (4):16, 2234-43.*
 - 16) Kent R, Read C. *The Acoustic Analysis of Speech. 2nd ed. University of Wisconsin-Madison:2002.*
 - 17) Borden GJ, Harris KS, Raphael LJ. *Speech science primer: Physiology, acoustics and perception of speech: Baltimore, Maryland: Williams & Wilkins:1994.*
 - 18) van den Berg J, Vennard W. *Towards an objective vocabulary for voice pedagogy. NATS Bulletin 1959;15:10-5.*
 - 19) SundBerg, J. *Level and Center Frequency of the Singer's Formant J voice 2001;15:2.*
 - 20) Fant G. *Acoustic Theory of speech Production (Mouton, The Hague, 1970), 2nd ed*
 - 21) Dang J, Seikacho H, Honda K. *Local and global effects the priform fossa on speech spectra. J Acoust Soc Am 1995;4 (1):2931.*