

성도공명(Vocal Tract Resonance)

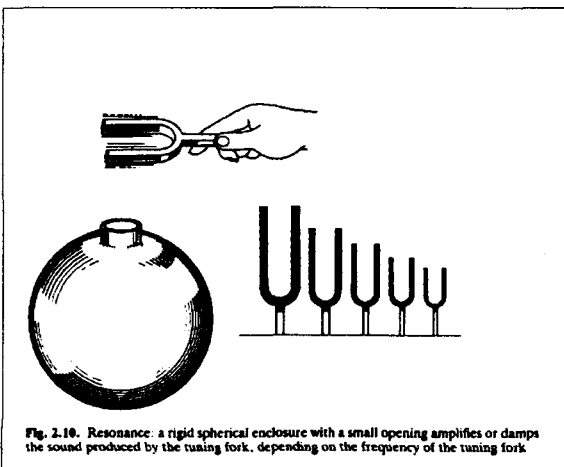
글쓴이: 최 홍식 (연세의대 이비인후과, 음성언어의학연구소)

서론

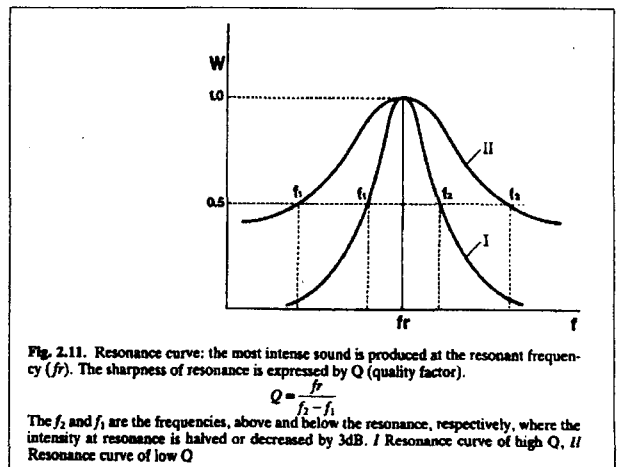
현악기의 대표격 악기라고 할 수 있는 바이올린이나 기타는 소리(음원)를 만들어 내는 역할을 하는 줄(현)과 공명통이 합쳐져 있는 모양을 하고 있다. 활로 바이올린 줄은 긁거나 기타줄을 손으로 튕겨서 소리를 만들어 내면, 이 소리는 공명통을 울려서 크고 아름다운 소리가 발생하는 것이다. 사람의 목소리도 이러한 현악기와 비슷한 구조를 가지고 있어서, 두 개의 줄모양을 하고 있는 성대에서 성대음(glottal sound)을 만들어 내며 이 성대음이 성도(聲道, vocal tract)를 통과하면서 여과(filtration) 되고 성도의 모양에 따른 특성에 따라 공명(resonance) 현상을 일으켜서 입술이나 콧구멍 바깥으로 방출되어 말소리(speech sound)를 만들어내는 것이다.

진동가능한 어떤 계가 그 계의 자연 진동수와 거의 같은 진동수를 갖는 주기적인 힘을 받을 때 그 계는 비교적 큰 진폭으로 진동하게 되는데 이런 현상을 공명(resonance)이라고 한다. 공명현상을 이해하려면 우선 헬름홀츠 공명관(Helmholtz resonator, 그림 1)을 생각해 보는 것이 좋을 것이다. 좁은 구멍을 가지고 있는 단단한 공모양의 통의 입구 부분에 여러 가지 다양한 파장의 소리굽쇠를 튕겨서 갖다 댈 때, 어떤 때는 통이 울리며 공명하고 어떤 소리굽쇠에는 공명하지 않는(damped) 것을 발견하게 된다. 공명관이 가지고 있는 자연진동수와 맞는 소리굽쇠 소리의 공기 진동이 공명관 내부의 공기를 공진시킴으로써 발생하는 현상이며, 이 때 헬름홀츠 공명관의 공명 커브를 표로 나타낸 것이 그림 2이다. 공명관 내부가 단단할수록 공명되는 주파수대가 좁아서 좁은 산 모양(곡선 I)을 보이며, 높은 Q값(high Quality value)을 가지고 있다고 한다. 이를 다른 말로는 bandwidth가 좁다라고 표현할 수도 있다.

< 그림 1 >



< 그림 2 >



1. 성도와 공명

소리굽쇠가 한 가지의 파장만을 가지고 있는 순음(pure tone)을 만들어 내는데 비하여, 현악기나 성대음은 기본주파수와 그 배수의 파장들로 구성되는 배음(harmonics)들이 함께 만들어지며, 이 기본음과 배음들은 공명관을 통과하지 않는 경우에는 1 옥타브 올라갈 때마다 12dB 씩 줄어드는 것으로 알려져 있다. 사람 말소리의 모음과 유성자음은 음원인 성대에 의한 주기적인 공기진동이 공명체인 성도를 공진시킴으로써 발생된 음성과형으로 시간에 따라 변화하는 주기적인 복합파형을 가지고 있다. 이 복합파형은 성대진동에 의한 기본진동음(기본주파수, fundamental frequency, F0)과 그것의 배음(harmonics)들로 역시 구성되며, 배음들의 진동수는 기본 진동의 정수배로 이루어져 있으나 각각의 배음들은 일률적으로 크기가 감소되지 않고 파장에 따라 다른 진폭을 가지고 있다. 그 이유는 사람 공명관인 성도에서의 여파와 공명현상에 의한 변화가 생기기 때문이다.

사람의 공명관은 '인두강과 구강'의 주공명관과 '인두강과 비강'의 보조공명관으로 이루어져 있어서 영문자 'F'의 모양을 이루고 있고, '┌'자 모양으로 가운데가 꺾여 있다. 사람의 공명관을 한쪽은 막혀있고 한쪽은 열려있는 closed cavity resonance tube라고 생각할 때, 그 모습은 아래의 그림 3과 같은 것이다(90도 굽은 관이나 일자형 관의 차이는 거의 없는 것으로 간주할 때). 이 때 막혀있는 한쪽 끝에 성대가 있으며, 열려 있는 부분이 입술이라고 생각하면 될 것이다. 공명관을 따라 전파되는 종파(음파도 종파의 일종임)는 관의 끝에서 반사되어 진행파와 반사파의 간섭에 의하여 정상파(standing wave)를 만들 수 있다. 관의 끝이 막혀 있으면 반사파와의 위상차가 π 가 되어 관의 끝에서는 마디(node)를 이루고, 관의 끝이 열려 있으면 그곳에는 배(antinode)를 이루게 된다. 관의 양쪽 끝이 모두 막혀 있거나 모두 열려있는 경우에는 가장 낮은 공명주파수(F1, first formant, 제1음형대)는 $C/2L$ 에 형성된다. 여기서 C는 공기중에서의 소리의 속도(340m/sec)이고 L은 음향관의 길이이다. 다음의 공명주파수들은 기본공명주파수의 정수배 즉 $F_n = nC/2L$, $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 이다.

<그림 3 >

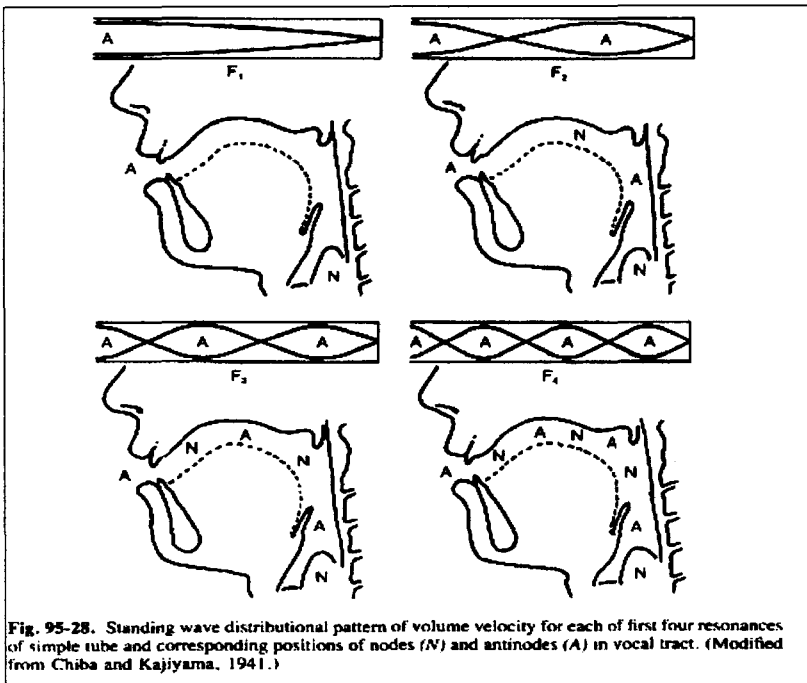


Fig. 95-25. Standing wave distributional pattern of volume velocity for each of first four resonances of simple tube and corresponding positions of nodes (N) and antinodes (A) in vocal tract. (Modified from Chiba and Kajiyama, 1941.)

사람의 공명관과 같이 한쪽은 막혀있고 한쪽은 열려있는 공명관의 경우는 가장 낮은공명주파수는 $C/4L$ 에 형성되고, 다음의 공명주파수들은 주파수의 홀수배 즉 $F_n=(2n-1)C/4L$, $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 에 생긴다. 성인 남자에서의 공명관의 길이(성대 직상방에서 입술까지의 거리)는 17cm 이므로 공명관의 단면적이 일정하다고 가정할 때, $F_1=(2*1-1)*34000\text{cm/sec}/4*17\text{cm}=500\text{Hz}$, $F_2=(2*2-1)*34000\text{cm/sec}/4*17\text{cm}=1500\text{Hz}$, $F_3=(2*3-1)*34000\text{cm/sec}/4*17\text{cm}=2500\text{Hz}$ 로 계산될 수 있으며, 즉 최저 공명주파수대인 제1음형대(F_1 , 1st formant)는 500Hz에 제2음형대는 1500Hz에 제3음형대는 2500Hz에 형성된다는 것을 알 수 있다. 실제에 있어서는 /어/와 같은 중성모음을 발성할 때 성도가 비교적 균일하게 열려 있으므로 성도의 단면적이 비교적 일정하다고 생각할 수 있으며, 실제의 음형대가 500, 1500, 2500Hz 근처에 형성되는 것을 알 수 있다.

위의 수식으로부터 우리는 성도의 길이 L 을 짧게 하거나 길게 하면 공명주파수가 변하게 됨을 예측할 수 있다. 실제로 성도의 길이가 성인 성도의 반 정도인 유아(약 8.5cm)의 경우 공명주파수는 1000, 3000, 5000 Hz 근처에 형성되며, 여성의 성도는 남성에 비하여 약 15% 짧아서(비율은 5/6임), 남자에 비하여 20% 가량 높은 위치인 600, 1800, 3000 Hz 부근에 형성된다.

2. 음원-필터 이론(Source-Filter Theory)

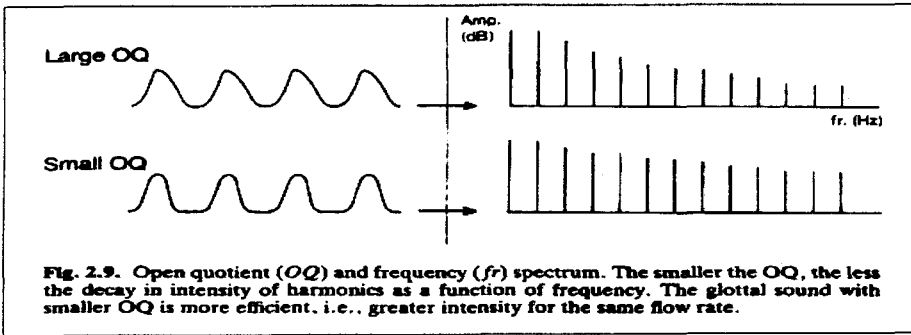
모음의 생성에 대한 가장 보편적인 이론이 '음원-필터 이론(Source-Filter Theory)'이다. 이 이론은 Fant(1960)에 의하여 제시되었는데, 입 밖으로 방사되어 나오는 에너지는 성대에서 발생하는 음원 에너지와 필터의 역할을 하는 성도에 의해 만들어진다는 것이다. 이 이론을 자세히 이해하기 위해서는 성대의 진동에 의해 생기는 음원 에너지를 스펙트럼의 관점에서 보아야 한다. 그리고 소리의 생성에 대한 에너지원-필터 이론의 적용은 소리 생성에 세 가지 요소가 주요 역할을 하는 것으로 가정한다. 이 세 가지 요소는 성대의 진동에 의한 '후두 스펙트럼(laryngeal spectrum)', 성도의 필터기능에 의한 '음형대(formant)', 그리고 공기가 입술 밖으로 방출될 때 나타나는 '방사특성(radiation characteristic)'이다.

1) 후두 스펙트럼(laryngeal spectrum)

성대의 진동에 의하여 발생하는 음원 에너지 즉 성대음(glottal sound)을 직선스펙트럼(line spectrum)으로 분석하면, 가장 낮은 주파수에 가장 큰 에너지를 가진 소리가 존재하는데 이를 기본주파수(F_0)라고 하며, 이 기본주파수의 정수 배에 해당되는 주파수대에 에너지가 연속하여 존재하게 되는데 이들을 배음(harmonics)이라고 하며, 한 옥타브 올라갈 때마다 12dB씩 크기가 줄어드는 것으로 알려져 있다.

그런데, 발성 시에 성대를 보다 강하게 닫아서 성문접촉 시간을 길게 하면, 다른 표현으로는 open quotient(OQ)를 짧게 하면, 배음들의 에너지의 감소가 덜하게 되므로 발성효율을 높일 수 있다고 알려져 있다.(그림 4, Fletcher, Flanagan)

< 그림 4 >

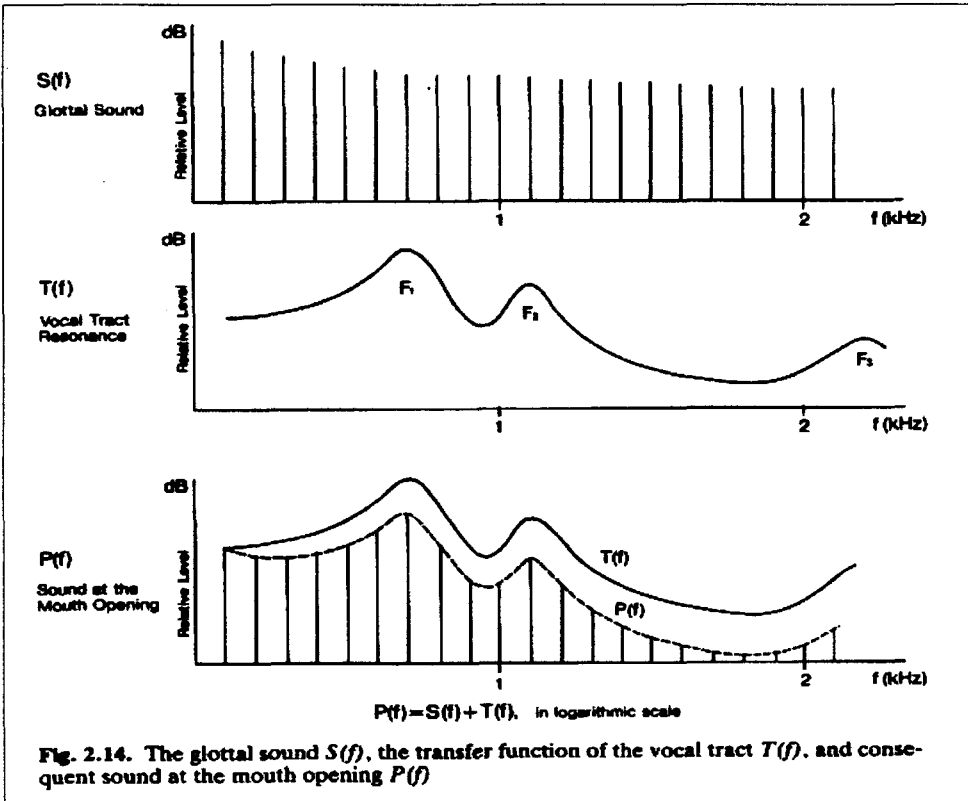


2) 음형대(Formant)

한쪽이 열린 공명관에서의 음형대의 설명은 앞에서 이미 자세히 설명하였으므로 여기서는 약하기로 하겠다. 음형대의 수는 이론상으로 무한할 수 있으나, 음성분석에 주로 사용되는 음형대는 보통 밑의 3-4개를 사용한다. 각 음형대의 설명이나 분석에서 음형대의 특징은 그 '음형대 주파수(formant frequency)와 '음형대의 대역폭(bandwidth of formant)'으로 기술된다.

이러한 음형대의 분포구조는 성도의 '전이기능(transfer function)'을 표시한다. 즉 후두로부터 올라온 에너지를 성도의 모양에 의하여 변형시켜 입 밖으로 배출되는 출력 에너지로 바꾸어주는 기능을 한다. 다시 말하면 성도는 소리 에너지를 직접 제공하는 것이 아니라 밑에서 올라온 에너지를 변형시키는 기능만을 담당한다.

< 그림 5 >



이 성도의 전이기능(transfer function)을 공식화하면 다음과 같다.

$$P(f) = S(f) \cdot T(f)$$

S(f)는 성대음(glottal sound), T(f)는 transfer function, P(f)는 입술 밖의 소리를 나타낸다. 이에 대한 설명을 그림으로 표현하면 그림 5와 같다.

3) 방사특성(Radiation characteristics)

소리가 입 밖으로 배출될 때 생기는 필터효과를 말한다. 즉, 입 밖으로 방사된 소리는 공기 중에서 모든 방향으로 퍼지게 되므로, 이때 소리는 방사되면서 에너지가 감소하게 되는데 높은 주파수대보다는 낮은 에너지대의 에너지 감소가 크다. 이러한 방사효과는 결국 높은 주파수대의 에너지만 받아들이는 '고주파필터(high-pass filter)'의 역할을 한다고 볼 수 있다. 이 저주파대와 고주파대의 에너지의 차이는 한 옥타브 마다 6dB 씩 증가한다.

3. 섭동이론(Perturbation Theory)

섭동이론(Perturbation Theory)이란 튜브공명관 즉 성도의 특정 부분에 대한 협착(constriction)이 음형대 주파수의 변화를 가져온다는 이론이다. 여러 종류의 모음을 발성할 때 성도의 모양 특히 혀의 위치와 모양에 따라서 성도의 일부분이 좁아지거나 넓어져서 성도 단면적은 아주 다양한 모습을 하게 된다. 이때 그 모음의 특성을 결정짓는 성도의 모양에 따라서 그 모음 음형대의 위치가 달라지게 된다. 이렇게 달라진 음형대 즉 공명주파수의 에너지가 우리 귀 안 와우(cochlea)의 유모세포 중 그 특정 주파수대에 해당되는 부분들의 자극을 일으켜서 우리가 모음의 차이를 인식할 수 있게 되는 것이다.

이때 마디(node)와 배(antinode)의 협착과 벌어짐에 따라 다음과 같이 음형대의 위치 변화를 요약할 수 있다.

1) When the tube(vocal tract) is squeezed or constricted near a node for any resonance(formant), the resonance frequency(formant frequency) is raised.

2) When the tube is squeezed or constricted near an antinode for any resonance(formant), the resonance frequency(formant frequency) is lowered.

4. 좋은 발성이 되기 위한 조건

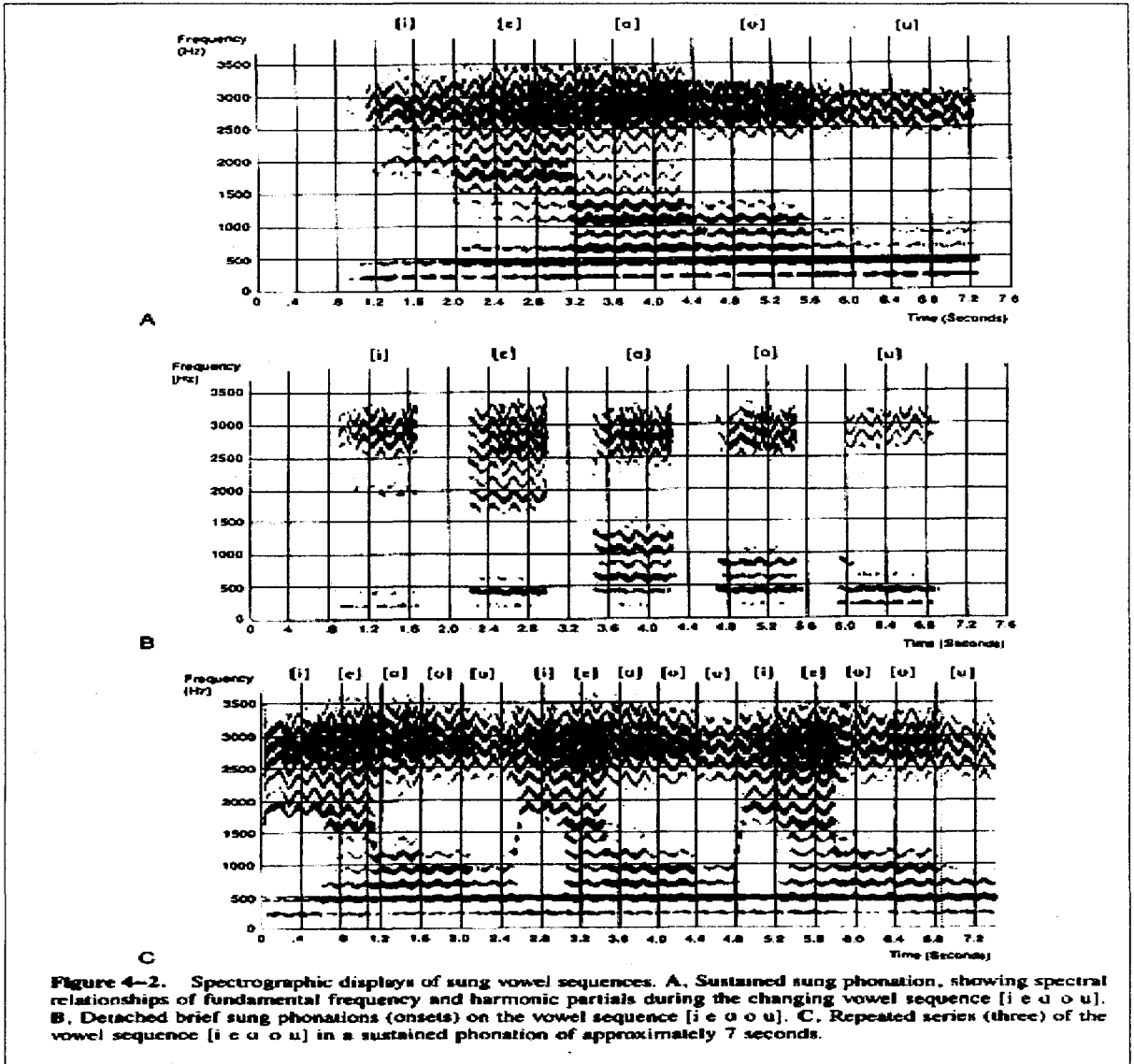
성악가가 좋은 발성을 하기 위한 조건들을 위에서 설명한 이론을 근거해서 요약해보면 다음과 같다.

1) 크고 좋고 효율적인 성대음이 만들어져야 한다.

- OQ를 줄이기 위하여 성대를 적절히 강하게 닫아야 한다. 그래야만 배음들의 에너지 감소를 줄일 수 있다. 그러나, 너무 과도하게 성대를 닫으면 오히려 효율이 떨어질 수 있다.

- 성문하압을 증가시키기 위하여 성대를 닫을 뿐만 아니라, 호흡양을 많게 해야 한다.
- 성대가 붓거나 염증이 생기면, 성대 점막(cover)이 공기의 흐름을 주기별로 명확하게 끊어주지 못하므로 성대음이 명확하게 만들어지지 못하거나 잡음이 생기게 된다.
- 성대근육과 성대인대, 성대점막들이 약간의 발성으로 피로를 느끼거나 붓지 않도록 많은 훈련이 필요하다.
- 노래 훈련이 끝난 후에는 충분한 휴식과 lubrication을 위한 수분 섭취와 영양 섭취가 필요하다.

< 그림 6 >



2) 좋은 공명이 되어야 한다.

- 공명강을 크고 넓고 길게 사용하여야 한다.
- 공명강을 덮고 있는 점막이 붓거나 염증이 생기지 않게 해야 한다. 점막이 부으면 음형대의 bandwidth가 넓어져서 공명 quality가 떨어지게 된다.
- 최대한의 공명에너지가 2500-3300 Hz 근처에 생기는 '성악가 음형대(Singer's formant, 그림 6)'를 형성할 수 있도록 훈련이 필요하다.
(훈련된 남자 성악가가 노래를 할 때 모음의 종류와 관계없이 2500-3300Hz 부분에 강한 에너지가 모여 있는 것을 singer's formant라고 한다.
- '성악가 음형대'의 형성을 위하여 성도의 길이를 늘리는 것이 도움이 될 수 있다. 특히 하인두 부분이 길어지면, F3와 F4가 서로 가까워져서 '성악가 음형대' 형성에 도움이 된다는 보고가 있으며, 이를 위하여는 입을 크게 벌린다던가 후두를 밑으로 내리는 방법이 있을 수 있겠음. 그러나 과도한 입벌림이나 의도적 후두 하강은 오히려 자연스러운 발성에 장애요인이 될 수도 있음.

참고문헌:

1. 홍수기: 음성의 음향적 검사. 음성검사법. 제2회 대한음성언어의학회 학술대회 심포지움. 1994:46-55
2. 안상철: 발성의 음향학. 대한음성언어의학회지 1995:6(1):88-102
3. 양병곤: 모음의 음향적 특징. 음성학 학술대회 자료집. 1994:113-124
4. Isshiki N: Resonance and articulation of the vocal tract. In: Isshiki N. Phonosurgery. 1st ed. Tokyo: Springer-Verlag 1989:14-18
5. Colton RH: Physiology of phonation. Vocal arts medicine. 1994:30-71
6. Kent, Ray D: Vocal tract acoustics. J Voice 1993:7:97-117
7. Fant, Gunnar: Acoustic theory of Speech production. 1960