

공기 역학 검사

서울대학교 의과대학 이비인후과학교실,¹ 서울대학교 의학연구원 감각기관연구소²

권택균^{1,2} · 임윤성¹

= Abstract =

Aerodynamic Analysis of Phonation

Tack-Kyun Kwon, MD^{1,2} and Yun-Sung Lim, MD¹

¹Department of Otorhinolaryngology, College of Medicine, Seoul National University, Seoul; and

²Sensory Organ Research Institute, Medical Research Center, Seoul National University, Seoul, Korea

Several parameters are used for the assessment of phonatory function and voice quality in clinical settings. Glottic airflow, subglottal pressure, mean phonation time, laryngeal resistance and voice efficiency are the most commonly used aerodynamic parameters. Aerodynamic analysis is developed to evaluate phonatory energy source and to estimate laryngeal efficiency. Also these measurements have shown the good correlation with perceptions of breathiness and findings of glottic competence. Aerodynamic study is important to understand relationships between pulmonary and phonatory function.

KEY WORDS : Voice disorders · Voice analysis · Aerodynamic study.

서론

발성은 호흡과 관련된 다양한 기관에 의해 이루어지는 복잡한 생성단계를 거쳐 이루어지는데, 일차적으로 발성에 필요한 공기 흐름은 폐와 호흡근의 작용에 의해 생성되며 이로 발생한 기류에너지는 성대를 지나면서 소리에너지로 변환되고 다시 인두, 구강, 비강 등의 발성관(vocal tract)을 거치면서 공명되어 최종적인 음성의 형태를 갖추게 된다. 발성과정에서 공기의 흐름과 압력은 성대의 에너지 전환과정에 필요한 원동력이 되며 정상 발성 기전이나 병적 현상을 설명하기 위해 발성에 필요한 에너지의 물리적인 특성을 이해하는 것이 필수적이다(Fig. 1).

임상적으로 음성 기능 검사의 목적은 발성기관의 기능을 평가하고, 음성장애의 정도와 원인을 분석하여 치료의 방침을 정하는데 있다. 음성 기능검사에는 공기 역학적 지표에 관한 공기 역학 검사(aerodynamic study), 성대의 진동상

태를 관측하는 성대 진동검사(vocal fold vibration study), 발생된 음성의 음향심리적 지표에 관한 청각심리검사(psychoacoustic study), 발성기능에 관련 있는 후두의 방사선 혹은 특수관찰법 등의 특수 검사, 발성의 정신심리학적 검사와 성대의 진동상태를 조절하는 신경근계의 기능을 검사하는 신경 생리 검사(neurophysiologic study) 등이 있다.

본론

공기 역학 검사는 성문하압(subglottic pressure), 후두 저항(glottal resistance), 호기류율(airflow rate), 음성효율(vocal efficiency) 등의 지표를 측정하여 성대의 효율성과 관련된 정보를 제공한다. 공기 역학 검사의 정상치는 매우 다양하게 분포하여 환자간의 비교는 큰 의미가 없는 경우가 대부분이나 치료 전후에 발생하는 지표의 변화를 보는 것은 성문 폐쇄와 관련되어 유용하게 사용될 수 있다. 이에 공기 역학적 지표들을 나누어 보면 Table 1과 같다(Table 1).

1. 성문하압(Subglottal pressure, Psub)

성문하압은 발성 시 호기 노력(expiratory effort)과 후두 진동 시 성대의 개폐쇄 운동에 의해서 크게 좌우되기 때문에 임상에서 이런 지표들을 정확하게 측정하는 것은 어

논문접수일 : 2008년 9월 18일

심사완료일 : 2008년 10월 31일

책임저자 : 권택균, 110-744 서울 중로구 연건동 28번지

서울대학교 의과대학 이비인후과학교실

전화 : (02) 2072-0738 · 전송 : (02) 745-2387

E-mail : kwontk@snu.ac.kr

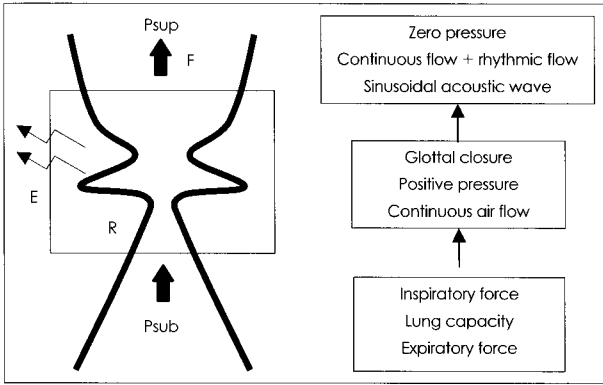


Fig. 1. An energy converter of the larynx (aerodynamic model). Psub : subglottal pressure, Psup : supraglottal pressure, E : efficiency, R : resistance.

Table 1. Aerodynamic parameters

Flow-related	Mean airflow rate (MFR) Maximal phonation time (MPT) Phonation quotient (PQ)
Pressure-related	Subglottal pressure (Psub) Phonation threshold pressure (PTP)
Calculated parameters	Vocal Resistance Vocal Efficiency

려운 일이다. 대개 호기 노력과 성문 폐쇄 정도, 그리고 성대 점막을 진동시키는 힘을 증가시킬수록 성문하압은 커지게 되며 그 결과 성문하압은 음의 강도(loudness)와 밀접한 관련을 가진다.

성문하압을 정확하게 측정하기 위해서는 압력계(manometer)를 측정하고자 하는 공간에 삽입을 해야 하는데, 기관절개창, 기관천자를 통해 성문하공간의 압력을 직접 측정하거나 구강을 통해 성문하 공간에 작은 압력계를 삽입하여 측정할 수 있다. 이러한 방법을 통해 정확한 성문하압을 측정할 수 있으나 이들은 침습적인 방식으로 임상적으로 사용되기에는 제한이 있어 동물실험이나 연구목적으로 제한된 임상시험에 사용된다. 따라서 임상적인 적용을 위해서는 간접적인 성문하압 측정의 방법이 사용되는데, 식도에 압력계를 삽입하여 식도내압을 측정함으로써 성문하압을 추정하기도 하는데 이는 흉곽내압에 의해 변화될 수 있으며 압력변화에 대한 반응속도가 느리기 때문에 정확도가 떨어지며 이 역시 식도 내 압력계 삽입이라는 비교적 침습적인 방법으로 흔히 사용하지 않는 방법이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 비침습적이고 반응속도가 빠른 구강내압을 측정하게 되었는데, Sawashima 등은 일정한 소리를 내게 하면서 성문하압을 간접적으로 측정하는 방법을 제시하였다. 즉, 400msec의 기도 폐쇄 직후의 구강 내 압력이 성문하압을 잘 반영하며, 모음-/p/-모음 시에 구강내압 최고

치를 측정하여 성문하압을 추정할 수 있다고 보고하였다.¹⁾²⁾

또한 Kitajima와 Fujita는 이 방법을 일측성 성대마비 환자 및 부분 후두 적출술 환자에서 측정한 결과를 기관절개구를 통한 직접 측정 방법과 비교하여 /i : pi : /시의 구강내압은 /i : /시의 성문하압과 거의 일치함을 관찰하였다.³⁾ Jiang 등은 성문하압 추정치가 피험자의 경험적인 요소 즉, 호기력과 발성관의 모양에 따라서 영향을 받으므로 피험자가 예측하지 못하는 시기에 구강 공기 흐름의 차단을 통하여 피험자의 경험적인 요소를 배제하는 기계장치를 개발하였고, 공기 차단의 기술적인 조작을 통해 공기 차단과 관련된 영향을 최소화 하는 방법을 제시하였다.⁴⁾⁵⁾ 또한 최근에는 성대조직의 특성 및 성대의 구조에 따라 변화하는 수학적 모델을 제시하여 임상 응용의 기반을 제공하고 있다.⁶⁾

대개 성문하압은 정상적으로 5~10cmH₂O 정도로 알려져 있으나 구강내압을 이용하여 성문하압을 추정할 때에는 매우 많은 변수에 의해 변화하므로 성문하압의 수치를 해석할 경우 성문의 폐쇄 정도와 보상기전을 감안하여 해석에 주의를 기해야 한다.

성문하협착증, 성문협착증 등 기도를 폐쇄시키는 병변이 있는 경우 비정상적으로 증가하고, 폐기능이 저하되어 있거나 기관절개구를 갖고 있는 경우 감소한다. 성문폐쇄부전이 있을 경우 호기 노력(expiratory effort)가 일정할 경우 성문하압이 감소하지만 대부분 소리를 내기 위해 매우 증가된 호기노력을 보이므로 성문하압이 증가하게 된다. 단, 과보상된 성문폐쇄부전에서는 매우 큰 성문하압을 보이며 기능성발성장애나 내전형 연속성 발성장애에서 이와 같은 현상이 발생한다.

2. 발성 역치 압력(Phonation threshold pressure, PTP)

발성 역치 압력은 발성을 위해 성대 점막을 진동시키기 위한 최소한의 성문하압을 일컫는다. 낮은 발성 역치 압력이란 곧 상대적으로 적은 호흡의 뒷받침(respiratory support)으로도 발성을 시작할 수 있다는 뜻으로 다양한 인자에 의하여 영향을 받는다. 한 예로 건조한 구강, 성대점막, 또는 성대 폴립과 같이 성대에 실제로 병변을 가지고 있는 경우 정상적인 성대 점막보다 더 높은 발성 역치 압력을 필요로 한다는 것이 알려져 있다.⁷⁾ 또한 파킨슨씨 병과 같이 근육을 침범하는 신경계 질환 환자에서도 발성 역치 압력은 증가한다.⁸⁾

3. 최대 발성 지속 시간(Maximal phonation time, MPT)

최대 발성 지속 시간은 발성 능력을 보는 단순하지만 유용한 지표 중의 하나이다. 환자에게 최대 흡기를 시킨 후 편안한 상태로 일정한 높이와 음의 강도로 최대한 길게 /a/

발성을 하게 하여 시간을 측정하며, 총 3회를 시행해 그 중 최대 시간으로 정의한다. 성문하 공기 흐름이 성대에서 비효율적으로 소비되는 경우 최대 발성 지속 시간은 감소하며 이는 성문 폐쇄 부전과 관계가 있다. 그 결과 일측성 성대마비 환자같은 대부분의 음성장애 환자에서 최대 발성 지속 시간은 감소한다. 정상 성인의 최대 발성 지속 시간의 평균치는 남자는 약 30초, 여자는 약 20초이며, 비정상치는 남자에게는 15초, 여자에서는 10초 이하이다. 최대 발성 지속 시간은 환자의 폐활량에 의해 크게 좌우 되므로 폐활량을 고려하여 해석하여야 한다.

4. 평균 호기류율(Mean airflow rate, MFR)과 발성지수(phonation quotient, PQ)

지속적인 발성 시 성문에서의 호기류율의 평균값을 평균 호기류율이라고 하며 이는 발성 시 사용되는 총호기량(total volume of air used during phonation)을 발성시간(phonation time)으로 나눈 값이다. 환자에게 /a/를 편안하게 내도록 요구하고 pneumatachograph 또는 hot-wire flowmeter를 이용하여 호기류율을 측정한다. Pneumatachograph의 경우 일정 시간 이상 지속되는 기류를 통한 평균 호기류율의 측정에 적합한 방법이며, 연축성 발성장애(spasmodic dysphonia) 환자에서의 갑작스런 호기율 변화 등도 측정이 가능하다.

평균 호기류율은 성문저항에 의해 크게 좌우되어 성문 폐쇄 부전의 경우 증가하며 성문 폐쇄나 대부분의 기능성 음성장애에서 감소한다. 정상 성인남자의 평균 호기류율은 약 100~140mL/sec이며 여자는 90~120mL/sec이다. 보통 정상 발성 시 호기류율이 한국인에서 남자 195mL/sec, 여자에서 153mL/sec를 넘으면 성문 폐쇄 부전을 의심하여야 한다.

이때 만약 적절한 측정 장치가 없다면 평균 호기류율 대신 발성지수(phonation quotient, PQ)를 사용할 수 있다. 발성지수는 폐활량(vital capacity)을 최대 발성 지속시간으로 나눈 값으로 발성 지속시간의 호기량은 폐활량보다는 적기 때문에 발성지수는 평균 호기류율보다 커지지만, 평균 호기류율과 발성지수가 양의 상관관계를 가지고 있으므로 임상적으로 발성지수는 평균 호기류율을 대신해서 사용하고 있다. 발성지수의 정상 평균치는 남녀 모두 약 140 mL/sec이며 300mL/sec 이상일 경우 폐쇄부전을 의심할 수 있다.

5. 후두 저항(Laryngeal resistance)과 음성 효율(vocal efficiency)

후두 저항은 성문하압을 평균 호기류율로 나눈 값으로

이는 실제로 성문의 폐쇄 정도, 성대의 내전력(adduction force), 성대의 강직성(stiffness) 등과 같은 후두의 물리적인 상태를 반영하진 않는다. 또한 주의하여야 할 것은 후두 저항의 계산 값에는 많은 인자들이 관여하므로 후두의 상태를 정확히 판단하기 위해서는 후두 저항값 이외에 스트로보스코피와 같이 기타의 가능한 검사를 종합한 결과를 고려하여야 한다. 대개 내전형 연축성 발성장애(adductor type spasmodic dysphonia)와 같이 성문폐쇄를 일으키는 병변의 경우 저항이 증가하며 성대의 조직결손과 같이 성문 폐쇄부전이 있는 경우 감소한다.

음성 효율은 vocal efficiency, glottal efficiency, aerodynamic efficiency로 지칭되며, 임상적으로 후두 등의 특정 부위를 통한 과정이 아닌 흉강과 상기도, 두개골을 포함하는 전반적인 음도(vocal tract)에서의 음성 산출 양상을 보여주는 지표이다. Van den Berg는 음압에너지(acoustic power)를 성문하압(subglottic air pressure)으로 나눈 값으로 음성 효율을 정의하였으며, 이후 Carroll은 음압 에너지(acoustic power)를 공기역학적 에너지(aerodynamic power)로 나눈 값으로 정의하였다.⁹⁾

음압에너지는 음압에 의해 영향을 받고, 공기역학적 에너지는 성문하압과 음성효율을 곱한 값에 영향을 받는다. 결국 음성 효율은 적은 성문하압으로 높은 음압을 발생시킬 때 증가하게 된다. 그러므로 음성 효율은 음성에 힘을 주거나 후두의 긴장성이 증가할 때 높아질 수 있다. 정 등은 고음과 큰 소리 발성 시 현저하게 음성 효율이 높아지는 것을 보고하였다.¹⁰⁾

6. 공기 역학적 검사의 실제

Ramon 등은 일측성 성대 마비 환자에서 GORETEX를 이용한 성대 내전술 및 피열연골 내전술 시행 전후의 음성 변화를 연구하였다.¹¹⁾ 총 28명의 수술 전후의 공기 역학적 검사를 분석한 결과에 따르면 약 3.49sec의 최대 발성 지속 시간의 증가와 /pae/의 3.06dB의 평균 음 강도의 증가 및 0.33L/sec의 평균 호기류율의 감소를 보였으나, 성문하압의 차이는 없었다. 이들은 최대 발성 지속 시간의 증가는 성대 내전술 및 피열연골 내전술의 결과로 해석하였고, 평균 호기류율의 감소는 수술 직후의 환자의 불편함에 의한 영향으로 해석하였다.

또한 성문하압의 차이가 없었던 것은 발성 지속 시간과 평균 호기류율의 변화로 인해 그 값이 상쇄된 것으로 판단하였다. 그러나 실제로 공기 역학 검사는 환자의 노력에 따라 결과가 달라지는 문제점이 있어 수술 후의 음성을 평가하는데 제한이 있음을 주지하면서 지속적인 연구가 필요

함을 지적하였다.

Peak 등은 후두 미세 수술 전후의 음성 변화를 비교 분석하기 위하여 공기역학 검사 지표로 평균 호기류율, 음성 효율, 최대 발생 시간, 최대 발생압 등을 포함한 음성 검사를 시행하였다.¹²⁾ 그 결과 평균 호기류율이 158.08mL/s 에서 132.16mL/s로 감소하였고, 음성 효율은 0.28에서 0.38로 증가하였으며, 최대 발생압은 86.1dB에서 88.7dB로 증가하였다. 그러나 최대 발생 시간에는 10.26sec에서 9.7sec로 유의한 변화를 보이지 않았다. 즉, 수술 전후의 공기 역학적 검사를 포함한 다양한 음성 검사의 유의한 차이를 바탕으로 이들은 후두 미세수술을 통한 성대의 물리학적 성질의 개선 효과를 입증할 수 있었다.

결 론

공기 역학적 음성 검사는 1980년대 초부터 임상에 도입되었으며 현재에는 성문하압과 성문 호기류율을 측정하는데 주로 사용하고 있다. 검사 지표의 제한적인 의미로 인해 아직까지는 임상적으로 널리 사용되고 있지 않으나 최근에는 복잡한 공기음성학적 이론의 적용과 함께 음성 연구에서 새로운 주목을 받고 있어 앞으로 이에 대한 지속적인 관심이 필요하다.

중심 단어 : 음성분석 · 공기 역학 검사.

REFERENCES

- 1) Sawashima M, Honda K, Aoki Y. Use of the airway interruption for evaluating aerodynamic conditions in phonation. *Jpn J Logop Phoniatr* 1987;28:257-64.
- 2) Smitheran JR, Hixon TJ. A clinical method for estimating laryngeal airway resistance during vowel production. *J Speech Hear Disord* 1981;46:138-46.
- 3) Kitajima K, Fujita F. Estimation of subglottal pressure with intraoral pressure. *Acta Otolaryngol* 1990;109:473-8.
- 4) Jiang J, Leder C, Bichler A. Estimating subglottal pressure using incomplete airflow interruption. *Laryngoscope* 2006;116:89-92.
- 5) Baggott CD, Yuen AK, Hoffman MR, Zhou L, Jiang JJ. Estimating subglottal pressure via airflow redirection. *Laryngoscope* 2007;117:1491-5.
- 6) Jiang J, Tao C. The minimum glottal airflow to initiate vocal fold oscillation. *J Acoust Soc Am* 2007;121:2873-81.
- 7) Jiang J, O'Mara T, Conley D, Hanson D. Phonation threshold pressure measurements during phonation by airflow interruption. *Laryngoscope* 1999;109:425-32.
- 8) Jiang J, O'Mara T, Chen HJ, Stern JJ, Vlagos D, Hanson D. Aerodynamic measurement of patients with Parkinson's disease. *J Voice* 1991;13:583-91.
- 9) Carroll LM, Sataloff RT, Heuer RJ, Spiegel JR, Radinoff SL, Cohn JR. Respiratory and glottal efficiency measures in normal classically trained singers. *J Voice* 1996;10 (2):139-45.
- 10) Chung SM. Aerodynamic study in Korean western classical singers. *The Journal of the Korean Society of Logopedics and Phoniatrics* 1998;9 (2):109-14.
- 11) Ramon AF, Jennifer GA. Aerodynamic and acoustic characteristics of voice before and after adduction arytenopexy and medialization laryngoplasty with GORE-TEX in patients with unilateral vocal fold immobility. *Journal of Voice*. In press.
- 12) Peak W, Janian C, Raymond C, David B. Aerodynamic and stroboscopic findings before and after microlaryngeal phonosurgery. *Journal of Voice* 1994;8 (2):186-94.