

발성시 후두 내 음향장에 대한 수치적 연구

배영민*, 문영준**

1. 서론

최근 들어 다양한 분야에서 각광받고 있는 생명공학(bioengineering)은 다양한 신체적 장애의 원인을 파악하고 대안을 제시함으로써 기능을 상실한 인간의 장기를 대체할 수 있는 인공장기의 개발에 크게 기여하고 있다. 특히 의사소통 과정에서 필수적인 부분인 발성(phonation)에 관한 연구는 흡연이나 대기오염과 같은 후천적인 원인으로 인한 장애를 치료하고 극복하기 위해 꾸준한 연구가 이루어져 왔다^{(1),(2)}.

성대의 비대칭성에 의해 야기되는 발성 장애를 치료하기 위한 외과적 시술시에는 성대의 대칭성을 확보하고 기존의 성대를 최대한 자연스럽게 복구하는 것이 치료의 핵심이라 할 수 있으며, 후두암 등으로 인해 후두가 완전히 적출된 환자의 경우, 발성 기관을 대체할 수 있는 인공적인 장치의 필요성이 절실하다. 이러한 의미에서 발성의 메커니즘을 정확히 이해하고, 기존의 성대를 대체할 수 있는 인공성대를 개발하기 위한 다양한 움직임은 세계적인 추세라 할 수 있으며, 국내에서도 이에 대한 관심이 크게 대두되고 있다.

본 연구에서는 Seo와 Moon이 제안한 유동-음향 분리기법⁽³⁾을 적용하여 저 마하수를 가지는 성대 주위의 유동 및 음향장을 정량적으로 예측하고, 더 나아가 회전운동 성분을 지닌 성대의 주기적 거동과 성문 저항(glottal impedance)의 연관성을 고찰함으로써 발성시 효율적인 성대의 움직임에 대해 고찰하였다.

2. 수치해석 방법

발성시 성대 주위의 맥동성 제트(pulsating jet)는 매우 낮은 마하수 영역($Ma < 0.1$)이므로 유동과 음향의 길이 스케일의 차이가 매우 커서 음향장 직접 수치모사(direct acoustic numerical simulation) 방법을 사용하기에 방대한 양의 계산을 필요로 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 저 마하수 영역에서 유동 및 음향장을 효과적으로 예측할 수 있는 유동-음향 분리기법을 적용하였다.

유동-음향 분리기법은 직접수치모사의 접근 방식

을 비압축성 유동 문제와 압축성 요동 문제로 나누어 해석하는 방법으로 전체적인 유동 현상을 비압축성 지배방정식을 통해 해석하고 이 유동장에서부터 원천항(source term)을 얻어 압축성 요동 방정식(perturbed compressible equation)을 해석하여 음향장을 얻어내는 방식이다. 또한 시간에 따른 성대의 주기적 운동을 모사하기 위해 Zhao 등이 제안한 2차원 성대 모델⁽⁴⁾을 사용하여 이동격자(moving grid) 기법을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 모사한 성대의 주기적 운동과정을 Fig. 1에 나타내었다. 성대가 열릴 때는 축소관의 형태로, 닫힐 때는 확대관의 형태로 회전운동을 하고 있으며, 유동조건으로는 성문상부와 성문하부의 압력차(Δp)가 832Pa이며, 성문의 최대직경(D_{max})과 최소직경(D_{min})은 각각 4.464mm, 0.8mm이다. 성대의 직경(D_0)은 20mm이고, 기본 주파수(f_0)는 200Hz로 두어 보편적인 성인 여성의 성대를 모사하였다.

3.1 맥동 유동과 음성 원음

발성시 수반되는 성대의 주기적 개폐 운동은 성문 상하부의 압력차에 의해 유도된 호기류(airflow)를 맥동 유동으로 전환시키며, 이러한 과정에서 한 주기 동안 성대 주위의 와류 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 성문의 직경이 최소일 때($0/4T$) 성대를 지나는 유량은 최소가 되어, 비교적 약한 강도의 와류가 생성된다. 닫혀있던 성대가 성문하부에서부터 서서히 열리기 시작하여 축소관을 형성한 후 최대 직경에 도달하게 되면($2/4T$) 성문내의 유속과 면적이 증가하여 유량은 최대가 되고 제트 유동의 불안정성이 커져 강한 와류를 형성한다. 이후 성문하부의 직경이 점차 줄어들게 되어 급확대관을 형성하게 되면서($3/4T$) 나타나는 유동박리 및 재부착 현상은 한 주기 내에서 가장 강한 와류를 형성하며 성문 상하부의 압력차를 최대가 되게 한다.

한편, 성대의 주기적 운동에 의해 발생하는 음성 원음의 생성과정을 살펴보기 위하여 한 주기 동안의 압력 요동($\Delta p'$)을 Fig. 3에 나타내었다. 성문의 직경이 최소에서 최대로 향하는 개방구간에서는 성문 하압의 영향에 의한 성문상부의 압축성 압력 요동을 확인할 수 있고 폐쇄구간에서는 팽창성 압력 요동 및 와류 구조에 의한 고주파 요동 성분을 확인

* 고려대학교 대학원

** 고려대학교 기계공학과

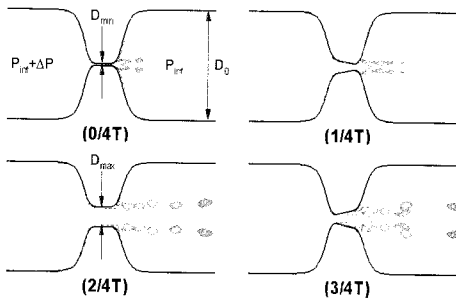


Fig. 1 Periodic vocal folds motion

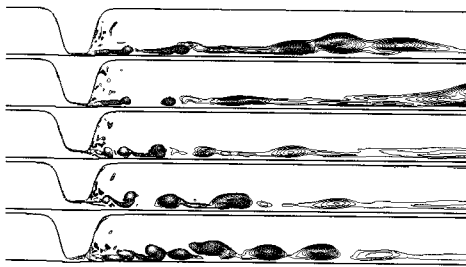


Fig. 2 Time evolution of vorticity

할 수 있다.

3.2 성문 저항

일반적으로, 성대의 주기적 운동은 성문하압이 성대의 임계압력(threshold pressure)보다 높아졌을 때 성문하부에서부터 열리기 시작하여 축소관을 유지하면서 완전히 개방되고, 유량의 증가와 더불어 압력이 떨어져(베르누이 효과) 임계압력 이하가

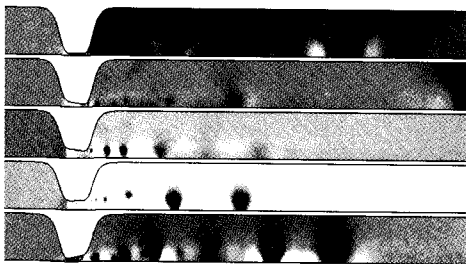


Fig. 3 Time evolution of acoustic pressure

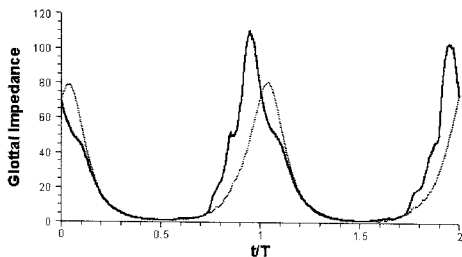


Fig. 4 Time histories of glottal impedance(kpa-s/l) :
solid(normal rotational motion, case1),
dotted(without rotational motion, case2)

되면 성문하부에서부터 닫히기 시작하여 확대관 형태를 유지하면서 성문이 폐쇄되는, 주기적 개폐운동에 회전운동이 증첩된 자활진동(self-sustaining oscillation)의 형태를 보인다. 이러한 성문벽의 회전운동이 음성원음의 생성시 효율성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 시간에 따른 성문저항의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

성대의 회전운동은 개방구간에서 축소관을 형성하여 성문 내부유동의 평균속도를 높이고 압력차를 줄임으로서 성문저항을 최소화하고, 반대로 폐쇄구간에서는 확대관이 되어 성문저항을 최대화한다. 즉, 성대의 개방과 폐쇄를 돕는 유동 특성을 만들어내기 위해 개방 전 축소관, 후 확대관의 형상을 취하여(case1) 폐에서 공급된 호기류를 음성원음으로 전환하는 과정에서 에너지의 손실을 최대한 줄이게 된다. 이러한 사실은, 성문의 개폐시 성대가 회전하지 않는 경우(case2)의 성문저항을 첫번째 경우와 비교해 봄으로써 재차 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 성대의 주기적 운동에 의해 후두 내에서 형성되는 맥동 유동과 음성원음의 생성과정을 확인하고 성대의 회전운동과 성문저항의 연계성을 고찰함으로써 발성시 성대의 주기적 거동이 음성 생성의 효율성을 증대시킴을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Mongeau, L., Frankel, N., Coker, C. H., and Kubli, R. A., 1997, "Characteristics of pulsating jet through a small modulated orifice, with application to voice production," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102, pp. 1121-1133.
- (2) Shadle, C. H., Barney, A., and Davies, P. O. A. L., 1999, "Fluid flow in a dynamics mechanical model of the vocal folds and tract. II. Implications for speech production studies," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, pp. 456-466.
- (3) Seo, J. H. and Moon, Y. J., 2003, "A hybrid method for aeroacoustic noise prediction of wall-bounded shear flow," AIAA Paper 2003-3270.
- (4) Zhao, W., Zhang, C., Frankel, S. H., and Mongeau, L., 2002, "Computational aeroacoustics of phonation, Part I : Computational methods and sound generation mechanisms," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112, pp. 2134-2146.