

## 음향 비강 측정기의 임펄스 응답 추정 방법의 개선

양진원, 최민주\*, 이용학  
제주대학교 의학과\*, 통신공학과  
전화 : (064) 754-3632 / 팩스 : (064) 755-3610

### An Improvement of Impulse Response Estimating Method in Acoustic Rhinometer

Won Jin Yang, Min Joo Choi, Yong Hak Lee  
Dept. of Telecommunication Engineering, Cheju National University  
E-mail : lyhackr@cheju.cheju.ac.kr

#### Abstract

Evaluation of the acoustic nasal geometry is obtained by estimating impulse response due to the nasal geometry. Conventionally, the Wiener filtering method proposed by Hunt has been used for estimating impulse response. In this paper, we proposed the Wiener filtering method using noise-to-signal power ratio for estimating impulse response. In result, the proposed method in this paper is effective than the conventional method.

#### I. 서론

입력신호와 반사신호로부터 비강 내부의 면적 변화 특성을 나타내는 임펄스 응답을 추정하고 추정된 임펄스 응답으로부터 W.A.(Ware and Aki) 알고리즘을 이용하여 비강의 면적 변화를 구하게 된다. 따라서 비강의 면적 변화를 판단하기 위해서는 먼저 정확한 임펄스 응답을 추정하는 것이 관건이다.

기존에 이용되고 있는 Hunt가 제안한 위너필터의 방법은 잡음이 부가된 신호로부터 임펄스 응답을 추정하는데 있어서는 안정적인 방법이다[1]. 그러나 위너필터에 도입된 척도가 잡음과 입력신호의 특성은 무시하고 안정성만을 고려한 것으로서 실제 임펄스 응답과

추정값 사이에 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 위너필터의 척도로써 잡음 대 신호 전력비를 도입하여 잡음과 입력신호의 특성에 따른 임펄스 응답을 추정하는 방법을 제안하였다. 이는 임펄스 응답 추정시에 잡음 전력이 신호 전력보다 커질 때 발생하는 불안정성을 제거함과 동시에 각각의 신호에 대하여 잡음 대 신호 전력비를 구함으로써 일률적인 위너필터의 척도를 이용하여 임펄스 응답을 추정한 기존의 방법보다 오차가 더 작게 된다.

실험에서는 음향 비강 측정기를 사용하여 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방법으로 임펄스 응답을 추정하였다. 추정된 임펄스 응답으로부터 W.A. 알고리즘을 이용하여 각각에 대한 면적을 구하고 실제로 사용한 phantom의 면적과 비교한 결과 본 논문에서 제안한 방법이 실제값에 더 가깝게 근사함을 확인하였다.

#### II. 임펄스 응답과 면적과의 관계

phantom 내부에 입사된 파에 대해서 특성 임피던스의 값은 다음과 같이 매질의 특성과 phantom의 면적  $A$ 에 의해서 결정이 된다.

$$z = \frac{\rho_0 c}{A} \quad (1)$$

여기서  $\rho_0$ 는 매질의 밀도,  $c$ 는 파의 전파 속도이다. 임펄스에 의해 여기되는 음향 전송로의 개구지점에서

관측되는 반사된 음향파를  $h(t)$ 로 정의되는 시스템의 임펄스 응답으로 정의한다. 예를들면 그림 1과 같은 음향 시스템에서의 음향 임펄스에 대해 고려하자.

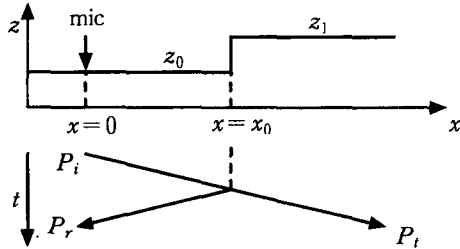


그림 1. 상단 : 거리에 따른 임피던스 분포, 하단 : 파의 진행 상황

$x = x_0$ 에서의 음향파에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_i + P_r = P_t \quad (2a)$$

$$\frac{P_i}{z_0} - \frac{P_r}{z_0} = \frac{P_t}{z_1} \quad (2b)$$

여기서  $P_i$ 는 입사파의 진폭이고  $P_r$ 과  $P_t$ 는 각각 반사파와 진행파의 진폭이다. 그리고  $z_0$ 와  $z_1$ 은  $x_0$ 의 좌·우측에 대한 phantom의 특성 임피던스이다. 이로부터 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{z_1 - z_0}{z_1 + z_0} \quad (3)$$

즉  $P_i$ 와  $P_r$ 의 측정값과 기지의 값  $z_0$ 를 갖고서 식 (2), (3)을 이용하여  $z_1$ 과  $P_r$ 를 구하게 된다. 입사파를 임펄스로 가정하였으므로 그림 1에 대한 임펄스 응답은 다음과 같이 반사파로 이루어진다.

$$h(t) = P_r \delta\left(t - \frac{2x_0}{c}\right) \quad (4)$$

따라서 임펄스 응답을 알게 되면 식(2)와 식(3)을 이용하면 임피던스를 구할 수 있고 식(1)의 임피던스와 면적과의 관계를 이용하면 면적을 구할 수 있다. 여러 개의 불연속점을 갖는 매질에 대해서도 W.A. 알고리즘을 적용하면 임펄스 응답으로부터 임피던스와 면적의 변화를 구할 수 있다[2].

### III. 임펄스 응답 추정 방법

입력신호와 반사신호로부터 임펄스 응답을 추정하는 일반적인 방법은 다음과 같다.

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{Y(f)}{X(f)}\right\} + \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{N(f)}{X(f)}\right\} \quad (5)$$

여기서  $X(f)$ ,  $Y(f)$ 와  $N(f)$ 는 각각 입력신호, 반사

신호와 잡음의 푸리에 변환이고  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 은 역 푸리에 변환을 나타낸다. 입력신호는 임펄스가 아닌 관제로  $X(f)$ 는 대역제한된 스펙트럼을 갖는다. 따라서 고주파 영역에서 거의 0이 되는  $X(f)$ 로  $N(f)$ 를 나누게 되면 상대적으로  $N(f)$ 의 값이 커지게 되어 추정된 임펄스 응답은 오차를 갖게 된다. 이러한 오차는 위너필터를 이용하여 임펄스 응답을 추정하게 되면 최소화할 수 있다[3].

#### III-1. 위너 필터

잡음이 부가된 출력신호 스펙트럼은 다음과 같다.

$$G(f) = H(f)X(f) + N(f) \quad (6)$$

구성하고자 하는 위너필터  $M(f)$ 를 이용하여 추정된 임펄스 응답 스펙트럼은 다음과 같다.

$$\hat{H}(f) = M(f)G(f) \quad (7)$$

실제의 임펄스 응답  $H(f)$ 와 추정된 임펄스 응답  $\hat{H}(f)$ 의 오차가 최소가 되도록 다음과 같이 임펄스 응답에 대한 평균 제곱 오차를 고려한다.

$$E\{\|H(f) - \hat{H}(f)\|^2\} = E\{[H(f) - M(f)G(f)][H^*(f) - M^*(f)G^*(f)]\} \quad (8)$$

여기서 \*는 complex conjugate이다. 식(11)의 오차를 최소화하기 위하여 다음과 같이  $M(f)$ 에 관하여 미분하고 그 결과를 0으로 둔다.

$$E\{[H^*(f) - M^*(f)G^*(f)]G(f)\} = 0 \quad (9)$$

식(9)는 다음과 같이 된다.

$$E\{\|H(f)\|^2 X(f)\} = E\{M^*(f)[\|H(f)\|^2 X(f) + \|N(f)\|^2]\} \quad (10)$$

따라서 위너필터는 다음과 같이 된다.

$$M(f) = \frac{X^*(f)}{\|X(f)\|^2 + E\{\|N(f)\|^2\}/E\{\|H(f)\|^2\}} \quad (11)$$

그러나 위너필터를 구성하는 척도인  $E\{\|N(f)\|^2\}/E\{\|H(f)\|^2\}$ 은 실제 알 수 없는 값이다. 따라서 이러한 척도 대신에 신호 전력에 대한 water level이라고 하는 상수를 이용하거나 신호에 부가된 잡음 분산을 이용하여 위너필터를 구성하게 된다[4].

#### III-2. 기존의 임펄스 응답 추정 방법

고주파 영역에서의 미약한  $X(f)$ 로  $N(f)$ 를 나눔으로써 발생하는 불안정성을 완화하기 위하여 Hunt는 다음과 같은 위너필터를 구성하였다.

$$M_H(f) = \frac{X^*(f)}{|X(f)|^2 + \gamma|W(f)|^2} \quad (12)$$

여기서  $\gamma = 0.064$ 이고  $|W(f)|^2$ 은 다음과 같다.

$$|W(f)|^2 = 1 - \cos \frac{2\pi f}{f_{\max}} \quad (13)$$

여기서  $f_{\max}$ 는 샘플링 주파수이다. Hunt는 고주파에서 신호가 미약한  $X(f)$ 를 역으로 취함으로서 나타나는 불안정성을 억압하기 위하여 식(13)과 같은 일률적인 척도를 이용하였다. 따라서 안정적으로 임펄스 응답을 추정할 수 있으나 잡음과 입력신호의 특성은 무시하고 안정성만을 고려함으로써 실제 임펄스 응답과 추정값 사이에 오차가 발생하게 된다.

### III-3. 잡음 대 신호 전력비로 구성된 위너필터

Hunt는 위너필터의 척도로서 식(13)을 이용하였으나 이는 임펄스 응답 추정의 안정성만을 고려하여 일률적인 바이어스를 가한 것이고 입력신호와 잡음에 따른 바이어스는 고려하지 못하였다. 그 결과 추정된 임펄스 응답은 실제 임펄스 응답과 오차가 발생하였다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 신호의 잡음 전력을 추정한 후에 잡음 대 신호 전력비를 위너필터의 척도로 이용하여 임펄스 응답을 추정하는 방법을 제안하였다. 잡음 대 신호 전력비(NSR:Noise to Signal Power Ratio)를 이용하여 구성된 위너필터는 다음과 같다.

$$M_{NSR}(f) = \frac{X^*(f)}{|X(f)|^2 + \gamma [S_n(f) / S_x(f)]} \quad (14)$$

여기서  $S_n(f)$ 와  $S_x(f)$ 는 각각 잡음과 입력신호의 전력스펙트럼이다. 잡음 대 신호 전력비를 척도로 사용한 위너필터의 특성은 다음과 같다.

$$S_x(f) \gg S_n(f) \text{인 경우 : } M_{NSR}(f) \approx \frac{1}{X(f)} \quad (15)$$

$$S_x(f) \ll S_n(f) \text{인 경우 : } M_{NSR}(f) \approx 0 \quad (16)$$

식(15)와 같이  $S_x(f) \gg S_n(f)$ 인 경우에 위너필터는 입력신호의 역이 되어 실제 임펄스 응답을 근사적으로 추정하게 되고, 식(16)과 같이  $S_x(f) \ll S_n(f)$ 인 경우에는 위너필터가 0이 되어 안정성을 유지하게 된다. 그리고 그 외의 경우에는 잡음 대 신호 전력비에 비례한 바이어스를 가해줌으로써 실제 임펄스 응답의 전력에 따른 추정이 가능하다.

## IV. 시뮬레이션

실제적인 실험에 앞서서 잡음 대 신호 전력비를 이용한 임펄스 응답 추정을 검증하기 위하여 다음과 같이 주어진 선형 cone의 면적  $A_{cone}(x)$ 에 대한  $h(t)$ 의 함수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$h_{cone}(t) = -ac \exp(-act) \quad (17)$$

for  $A_{cone}(x) = A_0(1+ax)^2$

여기서  $a$ 는 면적변화의 기울기에 대한 parameter로 20으로 두었고  $c$ 는 파의 전파속도(340 m/s)이고  $A_0$ 는 선형 cone의 초기 면적값으로써 10 cm<sup>2</sup>로 두었고  $t$ 와  $x$ 는 각각 시간과 거리를 나타내는 변수이다.

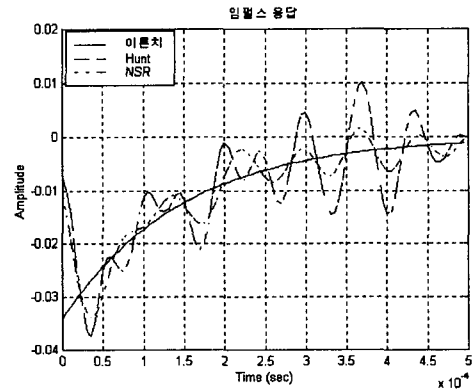


그림 2. 임펄스 응답

그림 2는 Hunt가 제안한 방법과 본 논문에서 제안된 잡음 대 신호 전력비를 이용하여 추정된 임펄스 응답을 나타낸 것이다. 잡음 대 신호 전력비를 이용하여 추정된 임펄스 응답이 이론적 결과에 더 가까움을 알 수 있다.

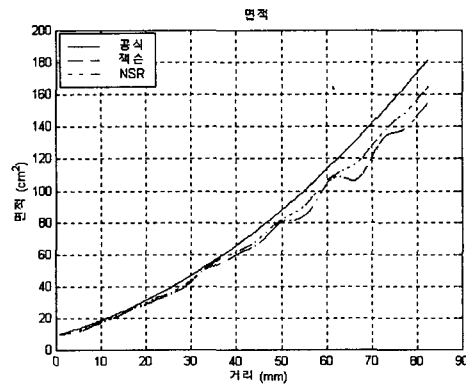


그림 3. 면적

그림 3은 추정된 각각의 임펄스 응답으로부터 W.A. 알고리즘을 이용하여 구한 면적을 나타낸 것이다. Hunt가 제안한 방법으로 추정된 임펄스 응답으로부터 구한 면적은 선형 cone의 면적 변화에 대하여 굴곡을 보여주고 있다. 그러나 잡음 대 신호 전력비로 추정된 면적은 선형 cone의 면적 변화처럼 굴곡없이 거의 선형적으로 나타났으며 선형 cone의 면적에 더 가까움을 확인할 수 있다.

### V. 실험

그림 4는 음향 펄스 발생기와 음향 펄스의 입사파와 반사파를 측정하는 음향 비강 측정기이다.

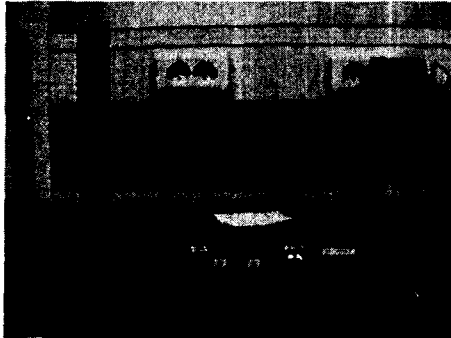


그림 4. 음향 비강 측정기와 음향 펄스 발생기  
음향 비강 측정기를 사용하여 실험한 원통형 phantom의 구조는 그림 5와 같다.

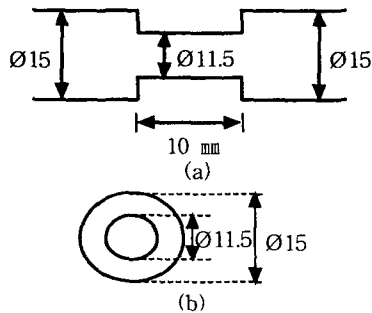


그림 5. 실험에 사용된 원통형 phantom의 구조  
(a) 측면 (b) 정면 (단위 : mm)

원통형 phantom 내부에 음향 펄스를 입사시키고 반사파를 측정하기 위하여 음향 비강 측정기를 사용하였다. 입사파와 반사파는 200 kHz로 샘플링을 수행하여 데이터를 얻었다.

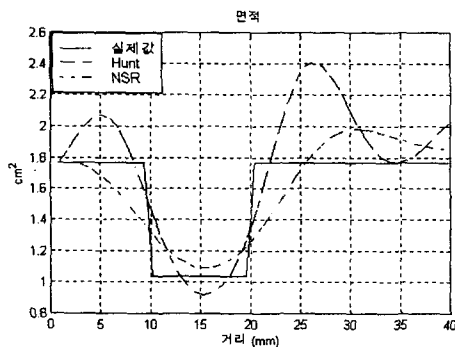


그림 6. 추정된 임펄스 응답으로부터 구한 면적  
그림 6은 Hunt가 제안한 방법과 잡음 대 신호 전력

비를 이용하여 추정된 임펄스 응답으로부터 W.A. 알 고리즘을 이용하여 구한 원통형 phantom의 면적을 나타낸 것이다. Hunt가 제안한 방법은 신호 전력이 줄어드는 부근에서 효과적인 바이어스가 미치지 못해 심한 굴곡을 보여줌으로써 실제 면적을 판단하기가 어렵다. 그러나 잡음 대 신호 전력비를 이용한 방법은 심한 굴곡없이 실제 면적에 접근함으로써 원통형 phantom의 면적 변화 추정이 가능하다.

### VI. 결론

본 논문에서는 음향학적 비강 구조를 판단함에 있어서 Hunt가 제안한 방법보다 개선된 잡음 대 신호 전력비를 이용한 위너필터로 임펄스 응답을 추정하는 방법을 제안하였다. Hunt는 임펄스 응답을 추정함에 있어서 입력신호의 역을 취함에 따라 발생하는 불안정한 요인을 완화하기 위하여 위너필터의 척도로 일률적인 바이어스를 가하였다. 그러나 임펄스 응답을 추정함에 있어서 중요한 입력신호와는 무관하게 안정성만을 고려함으로써 오차가 발생하였다. 따라서 임펄스 응답을 추정하는데 있어서 안정성과 더불어 입력신호와 잡음의 특성을 고려한 잡음 대 신호 전력비를 Hunt의 일률적인 바이어스 대신 이용하였다.

시뮬레이션 결과 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법보다 이론적인 임펄스 응답과 면적에 더 근사함을 확인하였고 실험에서는 본 논문에서 제안한 방법이 심한 굴곡없이 실제 면적에 근사함으로써 phantom의 구조를 판단하기가 기존의 방법보다 더 효과적이었다.

### 참고문헌

- [1] A. C. Jackson, J. P. Butler, E. J. Millet, F. G. Hoppin, S. V. Dawson, "Airway geometry by analysis of acoustic pulse response measurements", J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol, pp.523-536, 1977.
- [2] Ware. J. A, K. Aki, "Continuous and discrete inverse-scattering problems in a stratified elastic medium. I. Plane waves at normal incidence", J. Acoust. Soc. Am. Vol.45, pp.911-921, 1969.
- [3] P. N. Brier, J. N. Fletcher, P. A. Gorry, "On obtaining surface time profiles from pulsed molecular beam scattering time-of-flight measurements", Surf. Science, pp.525-534, 1996.
- [4] A. T. Walden, "Robust deconvolution by modified Wiener filtering", Geophysics, Vol.53, No.2, pp.186-191, 1988.