

파리의 청각 구조를 이용한 음원 방향 검지용 센서 설계

Design of Sound Source Localization Sensor Based on the Hearing Structure in the Parasitoid Fly, *Ormia Ochracea*

이 상 문*, 박 영 진

(Sangmoon Lee¹ and Youngjin Park¹)

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: The technique for estimation of sound source direction is one of the important methods necessary for various engineering fields such as monitoring system, military services and so on. As a new approach for estimation of sound source direction, this paper propose the bio-mimetic localization sensor based on mechanically coupling structure motivated by hearing structure of fly, *Ormia Ochracea*. This creature is known for its outstanding recognition ability to the sound which has large wavelength compared to its own size. ITTF (Inter-Tympanal Transfer Function) which is the transfer function between displacements of the tympanal membranes on each side has the all inter-tympanal information dependent on sound direction. The peak and notch features of desired ITTF can be generated by using the appropriate mechanical properties. A example of estimation of sound source direction using generated ITTF with monotonically changing notch and peak patterns is shown.

Keywords: estimation of sound source direction, ITTF (Inter-Tympanal Transfer Function), mechanical coupling, *Ormia Ochracea*

I. 서론

음원 방향 검지 기술은 공학적으로 마이크로폰 어레이를 통해 측정된 신호를 이용하여 음원의 방향(수평각, 고도각)을 검지하는 기술로 인지형 로봇, 모니터링 시스템, 화상회의 등에 적용되어 사용자와 시스템간의 상호작용을 위한 기반 기술로 사용되고 있다[1,2]. 대부분의 방향 검지 기술은 IcTD (Inter-channel Time Difference), IcLD (Inter-channel Level Difference) 및 스펙트럼 왜곡(spectral distortion) 정보에 기반하며 자유음장조건(free-field condition)을 가정하는 것이 일반적이다. 이러한 방향 검지에 사용되는 검지 요소(localization cue)들은 마이크로폰 어레이의 크기가 작게 되면 음원의 방향에 따라 이들의 변화가 작다. 극단적으로 마이크로폰 간의 거리가 매우 작은 경우에는 방향 검지가 불가능하다. 따라서 아주 작은 마이크로폰 어레이에 기존의 방향 검지 기술인 TDOA (Time Delay of Arrivals)를 이용한 방법[2,3], HRTF (Head-Related Transfer Function)을 이용한 방법[4,5] 또는 빔포밍(beamforming)방법 [6]을 적용하게 되면 요구하는 검지 성능을 만족시키기 힘들다.

따라서 작은 크기의 마이크로폰 어레이 또는 새로운 구조의 센서에 방향 검지 기술을 적용시키기 위해서 생물의 생체구조를 모방한 방향 검지 기법을 제안할 필요성이 있다. 크기가 작은 생물체, 예를 들어 박쥐, 개구리, 새, 귀뚜

라미, 파리 등은 사람의 청각 구조에 비해 매우 작은 크기의 청각 구조를 가지고 있으며 그들의 먹이감(pre) 혹은 교배대상(mate)을 표적으로 하는 방향 검지 방식을 살펴봄으로써 생체구조를 모방한 새로운 방향 검지 기법을 제안할 수 있을 것이다.

다수의 연구에 의해 생물들의 청각 구조 및 그들의 특성이 알려졌고 이로부터 그들의 방향 검지 방식에 대하여 예측되고 있다. 사람의 방향 검지 방식[1]에서부터 박쥐[7], 개구리[8,9], 귀뚜라미[10], 파리[11-13]등 중에 따라서 청각 구조 및 그 특성이 알려져 있으며 이들의 청각 구조 및 특성을 모방한 마이크로폰 및 방향 검지 센서[14-16]가 개발되고 있다. 박쥐는 초음파를 사용하여 물체의 거리 및 방향을 인지하는 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 제외하며 그 밖의 여러 생물들이 가진 청각 구조 및 그 특성에 대해서 살펴보도록 하자.

사람을 포함한 큰 포유류의 경우 각 청각 기관은 음향학적으로 분리(uncoupled, isolated)되어 있으며 입사되는 음압은 각각의 고막에 직접적으로 전달된다. 대략적으로 최대 1000 μ sec.의 최대 양이간 시간차와 머리에 의한 양이간 레벨 차이가 발생한다. 이와 대조적으로 새, 개구리, 곤충과 같이 작은 생물체들의 청각 기관은 내부 기도를 통하여 음향학적으로 연결(coupled)되어 있다. 입사되는 음압은 외부 공간과 내부 기도를 통하여 각각의 고막을 진동시키며 두 경로로부터 전달되는 음압의 차이가 방향 검지에 중요한 요소가 된다. 파리의 경우, 두 청각 기관은 같은 공간에 존재하며 각각의 고막은 기계적으로 연결(mechanically coupled)되어 있다. 또한 파리는 측정가능한 음파의 파장과 청각 기관의 크기비가 130으로 다른 생물체와 비교하여 기관의 크기에 비해 상대적으로 가장 큰 파장의 음을 인지할

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.
이상문, 박영진: KAIST 기계공학과

(smansl@kaist.ac.kr/yjpark@kaist.ac.kr)

※ 본 논문은 이 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)과 6차년도 두뇌한국(BK)21 사업에서 지원하여 연구하였음.

수 있는 것으로 알려져 있다[12].

최근 10년 사이에 파리의 청각 기관을 모방하여 방향 감지 및 센서의 개발에 적용되는 사례가 늘어나고 있다[14-16].

L. Tan과 R. N. Miles는 MEMS로 구현한 마이크로폰 다이어프램을 개발하였으며 기존의 마이크로폰보다 민감도 (sensitivity) 및 소음저감(noise reduction) 관점에서 향상된 성능을 보였다[15]. Q. Wang은 파리의 청각 구조를 모방하여 3개의 진동판과 레이저 변위 측정 센서로 구성된 방향 감지 장치를 제안하였다[16].

본 연구에서는 작은 크기의 센서 시스템에 적용가능한 방향 감지 기법에 대한 것으로 기존 연구자와는 달리 방향 감지 기술에 적용할 수 있는 기계적 결합 구조와 다이어프램의 기계적인 물성치(mechanical property)에 대해서 살펴 보며 적용가능한 물성치를 제안한다. 이렇게 제안된 물성치를 이용하여 음원의 방향에 따른 센서를 설계하고 그 특성을 살펴본다. 이 후, 이를 사람의 음성 신호를 방향 감지에 적용하였을 때의 감지 결과를 살펴본다. 움직이는 물체의 방향 및 거리 감지는 시각센서를 통해서도 가능하지만 [17,18], 본 연구에서는 음향신호만을 이용한 방향 감지에 초점을 둔다.

II. 파리 청각 기관

1. 파리(Ormia ochracea)의 청각 구조와 간단화된 모델

파리의 청각 기관의 간단화된 모델은 R. N. Miles에 의해 제안되었다[12,13]. 그는 파리 청각 기관 구조를 살펴보고 음원으로부터 음파가 전달될 때 파리의 앞가슴에 위치한 tympanal membrane의 동적특성을 살펴보았다. 이를 위하여 laser vibrometer를 이용하여 membrane의 움직임을 측정하였으며 이러한 특성을 근사화된 모델로 표현하기 위하여 그림 1과 같이 lumped mass를 가진 모델이 제안되었다. 좌우의 membrane은 lever 및 spring과 dash-pot으로 모델링되었으며 membrane사이의 결합조직은 spring과 dash-pot으로 모델링하였다. 이는 그림 1에서 살펴볼 수 있다. Membrane의 물리적 특성은 m_M, k_M, c_M 으로 표현되며 두 개의 membrane 사이의 결합 조직은 k_C, c_C 로 나타낸다. 생물체의 좌우대칭성을 표현하기 위해 좌우 membrane의 물성치를 일치하였음을 알 수 있다. Scanning electron micrograph를 이용하여 살아있는 파리의 조직의 물리적인 치수(길이, 넓이, 두께)를 측정하였고 이를 바탕으로 모델에 사용되는 물성치들을 추정하였다. 최종적으로 실제 파리 청각 기관의 동특성을 모사하기 위한 모델의 물성치는 표 1에 나타내었다.

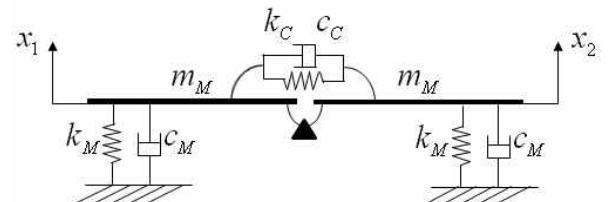


그림 1. 파리 청각 기관의 간단화된 모델.
Fig. 1. Simplified model of fly's hearing structure.

표 1. R. N. Miles가 사용한 기계적 물성치.

Table 1. Mechanical properties of R. N. Miles' model.

표기 (notation)	물성치 (property)	단위 (unit)
Membrane의 물성치		
m_M	2.88×10^{-10}	kg
k_M	0.576	N/m
c_M	1.15×10^{-5}	Ns/m
s^*	0.288×10^{-6}	m^2
결합조직의 물성치		
k_C	5.18	N/m
c_C	2.88×10^{-5}	Ns/m

* Membrane의 표면넓이를 나타낸다.

2. 모사된 파리(Ormia ochracea)의 청각기관의 동특성

생물학적으로 생물체의 기관은 좌우 대칭성을 띠는 것이며 이를 표현하기 위하여 R. N. Miles가 제안한 모델은 대칭적인 물성치를 가진다. R. N. Miles의 연구[12]에서는 좌우 membrane 각각의 동적 움직임(변위)을 측정하여 음원의 방향에 따라 표현하였다. 파리의 청각 기관의 좌우 길이는 520 μm 로 측정되었으며[11-13] 따라서 음파에 의해 발생하는 최대 도달시간차가 1.5 μsec .가 된다. 본 논문에서는 R. N. Miles가 측정한 기계적 물성치를 가진 모델을 공칭 모델(nominal model)로 정하고 음원의 방향에 따른 모델의 동특성을 살펴보기 위하여 각 membrane에서 측정되는 신호간의 전달함수를 살펴보면 그림 2와 같다. TDV (Time Delay Variation)은 음원의 방향과 관련이 있다. 예를 들어 TDV 값이 -1.5 μsec .때는 음원이 왼쪽에 치우쳐 있는 경우이며, 1.5 μsec .일 때는 음원이 오른쪽에 치우쳐 있는 경우이다. 또한, 0 sec.인 경우에는 음원이 정면에 위치할 때는 나타낸다. 그림 2에서 표현된 ITTF (Inter-Tympanal Transfer Function)는 III장에서 자세히 살펴보기로 한다.

III. 파리의 대칭 청각 모델 분석

1. 파리의 청각 모델의 운동 방정식과 ITTF (Inter-Tympanal Transfer Function)

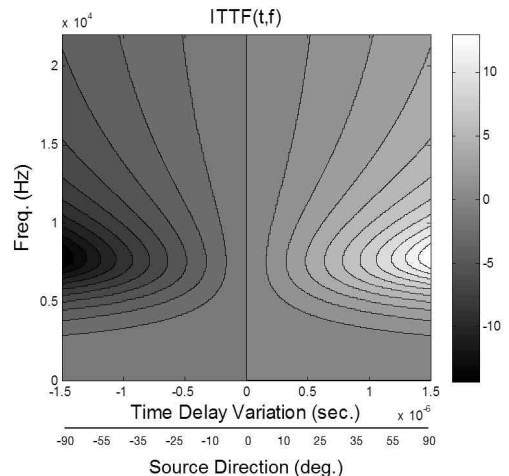


그림 2. R. N. Miles가 제안한 모델의 ITTF의 크기응답.
Fig. 2. Magnitude response of ITTF of R. N. Miles' Model.

그림 1에 나타난 파리 청각 기관의 간단화된 모델의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$m_A \ddot{x}_L + (c_M + c_C) \dot{x}_L + (k_M + k_C) x_L + c_C \dot{x}_R + k_C x_R = f_L \quad (1)$$

$$m_A \ddot{x}_R + (c_M + c_C) \dot{x}_R + (k_M + k_C) x_R + c_C \dot{x}_L + k_C x_L = f_R \quad (2)$$

이 때 f_L 와 f_R 은 음원으로부터 방사된 음파의 음압(sound pressure)에 의해 membrane으로 전해지는 가진력을 나타낸다. 음압과 가진력과의 관계는 membrane의 표면넓이와 관련이 있으며 이는 식 (3), (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_L = f f t^{-1} \left[\frac{H_{f_L}(w)}{P} \right] = s P \delta(t - \tau) \quad (3)$$

$$f_R = f f t^{-1} \left[\frac{H_{f_R}(w)}{P} \right] = s P \quad (4)$$

이 때 $H_{f_L}(w)$ 과 $H_{f_R}(w)$ 는 음원과 가진력간의 전달함수를 나타내며 음원이 원역장에 존재하기 때문에 두 전달함수는 크기가 같고 f_L 와 f_R 은 음원의 방향에 따라서 τ 만큼의 시간지연차이를 가지고 각 membrane을 가진다. s 는 membrane의 표면넓이를 나타낸다. 주파수영역에서의 분석을 위하여 식 (3)과 식 (4)를 식 (1)과 (2)에 대입한 후 푸리에 변환을 하면 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{-m_A w^2 + j(c_M + c_C)w + (k_M + k_C)\} X_L(w) + \{j c_C w + k_C\} X_R(w) = s P e^{-jw\tau} \quad (5)$$

$$\{-m_A w^2 + j(c_C + c_C)w + (k_M + k_C)\} X_R(w) + \{j c_C w + k_C\} X_L(w) = s P \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하면 tympanal membrane의 변위간의 전달함수(Inter-Tympanal Transfer Function, ITTF)를 구할 수 있으며 식 (7)과 같다.

$$H_{x_R/x_L}(w, \tau) = \frac{\{-m_A w^2 + j(c_M + c_C)w + (k_M + k_C)\} e^{-jw\tau} - \{j c_C w + k_C\}}{\{-m_A w^2 + j(c_M + c_C)w + (k_M + k_C)\} - \{j c_C w + k_C\} e^{-jw\tau}} \quad (7)$$

2. 기계적 물성치 변화에 따른 ITTF의 Peak와 Notch 패턴

ITTF의 특성을 살펴보기 위해서 ITTF의 분수부와 분모부를 실수부와 허수부로 나눌 수 있으며 이를 나타내면 식 (8)과 같다. 본 연구에서 사람의 음성 신호를 방향 검지 대상으로 하기 때문에 최대 관심 주파수를 4 kHz로 제한한다. 이 때 음성의 최대 주파수를 5 kHz로 정의를 하기도 한다.[5] 최대 발생 가능한 ITTD (Inter-Tympanal Time Difference)가 10 μ sec라 가정할 경우 $e^{-jw\tau}$ 을 선형화가 가능하며 식 (7)에 $e^{-jw\tau} = \cos(w\tau) - j \sin(w\tau) \approx 1 - jw\tau$ 을 적용하면 식 (8)과 같다.

$$H_{x_R/x_L}(w, \tau) = \frac{Re\{Num\} + j Im\{Num\}}{Re\{Den\} + j Im\{Den\}} \quad (8)$$

$$Re\{Num\} = k_M + ((c_M + c_C)\tau - m_A)w^2 \quad (8-1)$$

$$Im\{Num\} = (-m_A w^2 + k_M + k_C)w\tau + c_M w \quad (8-2)$$

$$Re\{Den\} = k_M - m_A w^2 + c_C w^2 \tau \quad (8-3)$$

$$Im\{Den\} = (c_M - k_C \tau)w \quad (8-4)$$

식 (8)에서 유추할 수 있듯이 ITTF의 notch는 식 (8-1)과 식 (8-2)가 0이 될 때에 발생하며 ITTF의 peak는 식 (8-3)과 식 (8-4)가 0이 될 때에 발생한다. 이러한 notch와 peak 패턴은 w 와 τ 의 함수로 나타나게 되는데 이를 나타내면 식 (9-12)와 같으며 이를 표 2에서 나타내었다.

표 2. Notch/peak 패턴이 발생하는 w 와 τ .

Table 2. Location of w and τ for notch and peak pattern.

Notch 패턴이 발생하는 w 와 τ	
실수부	$w = \sqrt{\frac{k_M}{\{m_M + (c_M + c_C)\tau\}}}$ (9)
허수부	$w = \sqrt{\frac{(k_M + k_C) + \frac{c_M}{\tau}}{m_M}}$ (10)
Peak 패턴이 발생하는 w 와 τ	
실수부	$w = \sqrt{\frac{k_M}{m_M - c_C \tau}}$ (11)
허수부	$\tau = \frac{c_M}{k_C}$ (12)

이와 같이 notch와 peak의 패턴은 식 (9)~(12)로부터 유추할 수 있다. 좌우 lumped mass간의 거리가 3.5 mm일 경우, 음파에 의해 발생하는 최대 도달시간차가 10 μ sec.가 된다. 이 때 ITTF를 구성하는 분자의 실수부와 허수부, 그리고 분모의 실수부와 허수부의 크기응답(magnitude response)을 그려보면 그림 3~6과 같다. 그림 3과 그림 4에 표현된 notch 패턴은 ITTF에서의 notch 패턴이 되고 그림 5와 그림 6에서의 notch 패턴은 ITTF에서 peak 패턴이 된다. 각각의 패턴은 식 (9)~(12)에서 나타낸 바와 같이 센서를 구성하는 기구부의 물성치와 연관이 있다. 그림 3~6은 R. N. Miles가 사용한 기계적 물성치들을 사용하였을 때의 결과를 나타낸다(표 1참고). 만약 도달시간차가 $\pm 1.5 \mu$ sec.내에서의 패턴들을 조합하게 되면 그림 2에서 도시한 ITTF의 크기응답을 확인할 수 있다. 그림 상에 표현한 w_∞ 와 τ_∞ 는 각 패턴들이 수렴하는 주파수와 도달시간차를 나타낸다.

3. 방향 검지 센서를 위한 ITTF 특성

2절에서 살펴본 바와 같이 ITTF의 특성은 그림 3~6에서 나타난 형태의 조합으로 표현된다. 본 연구에서는 이러한 ITTF의 특성을 이용하여 음성(voice)의 방향 검지 기술에 적용하고자 한다. 이를 위해서는 최적의 ITTF응답을 결정하고 그에 맞는 물성치들을 선택하여 사용하면 될 것이다.

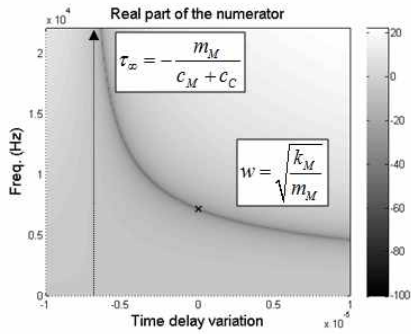


그림 3. 분수의 실수부 크기 응답.
Fig. 3. Magnitude response of real part of the numerator.

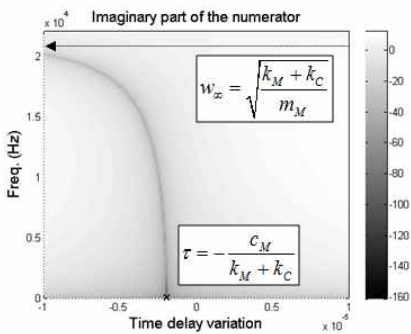


그림 4. 분수의 허수부 크기 응답.
Fig. 4. Magnitude response of imaginary part of the numerator.

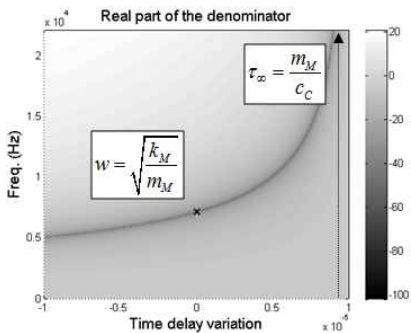


그림 5. 분모의 실수부 크기 응답.
Fig. 5. Magnitude response of real part of the denominator.

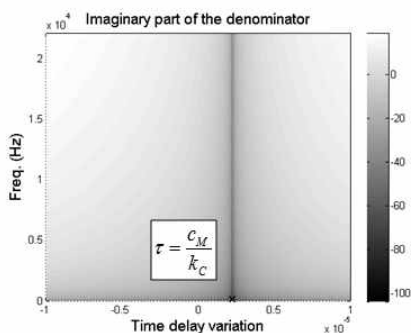


그림 6. 분모의 허수부 크기 응답.
Fig. 6. Magnitude response of imaginary part of the denominator.

본 논문에서는 최대 도달시간차가 10 μ sec.가 발생하는 센서를 이용하여 음성의 방향 검지에 사용가능한 센서를 설계하고자 한다. 사람의 음성은 4 kHz 이하로 주파수 영역이 한정되어 있기 때문에 4 kHz 이상의 주파수영역에서의 크기 응답은 의미가 없다. 또한 방향에 따라 일정한 검지 성능을 획득하기 위해서는 응답의 변화가 방향의 변화에 따라 일정하게 나타나야 한다. 따라서 본 연구에서는 4 kHz 이하 주파수 영역에서 음원이 왼쪽에 있는 경우, monotonically decreasing notch 패턴을 가지고 음원이 오른쪽에 있는 경우, monotonically increasing peak 패턴을 가지는 ITTF 응답을 음성 방향 검지를 위한 최적의 ITTF로 정의한다. ITTF를 식 (7)과 같이 $H_{x_R/x_L}(w, \tau)$ 로 정의를 하였기 때문에 음원이 왼쪽에 있을 때 ITTF가 관심 주파수 영역에서 notch 패턴을 가지고 반대로 음원이 오른쪽에 있는 경우에 peak 패턴을 가지도록 정의를 하였다. 만약 ITTF를 $H_{x_L/x_R}(w, \tau)$ 로 정의를 한다면 반대로 정의가 될 것이다. 제안하는 최적의 ITTF의 notch와 peak 패턴을 표현하면 식 (13)과 같다.

$$w_{obj,N}(\tau) = -\frac{f_{max}}{\tau_{max}}\tau, \text{ for } \tau \leq 0$$

$$w_{obj,P}(\tau) = \frac{f_{max}}{\tau_{max}}\tau, \text{ for } \tau \geq 0$$
(13)

여기서 $w_{obj,N}$ 와 $w_{obj,P}$ 는 각각 notch, peak 주파수를 나타내며 f_{max} 는 4 kHz이며 τ_{max} 는 10 μ sec.를 나타낸다.

이러한 notch와 peak 패턴을 가지는 ITTF를 생성하기 위하여 최적의 물성치들을 정하기 위하여 식 (14)~(16)와 같은 목적함수를 정의하여 이를 최소화하는 물성치를 찾아낼 수 있다.

$$J_t = J_n + J_p$$
(14)

$$J_n = \sqrt{\frac{\sum_{\tau} |w_{obj,N}(\tau) - w_n(\tau)|^2}{N_{directions}}}, \text{ for } \tau \leq 0$$
(15)

$$J_p = \sqrt{\frac{\sum_{\tau} |w_{obj,P}(\tau) - w_p(\tau)|^2}{N_{directions}}}, \text{ for } \tau \geq 0$$
(16)

$w_n(\tau)$ 과 $w_p(\tau)$ 는 물성치의 변화에 따라 생성되는 ITTF의 notch와 peak 주파수를 나타내며, $N_{directions}$ 은 음원의 방향의 수를 나타낸다. 이렇게 정의된 목적함수를 바탕으로 물성치에 따른 목적함수의 변화를 살펴볼 수 있으며 이를 통해 목적함수를 가장 최소화하는 물성치를 찾을 수 있다. Parameter Searching은 공칭 모델이 가지는 모든 물성치의 0.01배에서 100배의 범위 내에서 수행되었으며 최종적으로 선택된 물성치는 표 3에 나타내었다. 이렇게 제안된 물성치들을 이용하여 ITTF의 특성곡선을 그려보면 그림 7과 같다. 그림 8에서는 ITTF의 notch와 peak의 주파수를 나타내며 도달지연차가 음수일 경우에는 notch 주파수를 양수인 경우에는 peak 주파수를 표현한다. 그러나 R. N. Miles가

제안한 간단화된 모델을 이용하여서는 원하는 notch와 peak 주파수 패턴을 표현을 하는데 한계가 있음을 알 수

있다. 좀 더 desired ITTF를 생성하기 위해서는 모델이 가진 자유도(freedom of motion)가 커져야 할 것이나 본 논문에서는 기존의 모델이 가진 물성치에 관심이 있기 때문에 확장된 모델에 대한 해석은 제외한다.

표 3. 방향 감지를 위한 ITTF의 기계적 물성치.
Table 3. Mechanical properties for desired ITTF.

표기 (notation)	물성치 (property)	단위 (unit)
Membrane의 물성치		
m_M	2.88×10^{-8}	kg
k_M	5.76×10^{-3}	N/m
c_M	1.15×10^{-5}	Ns/m
s^*	0.288×10^{-6}	m ²
결합조직의 물성치		
k_C	5.18	N/m
c_C	2.88×10^{-3}	Ns/m

* 각각의 Membrane의 표면넓이를 나타낸다.

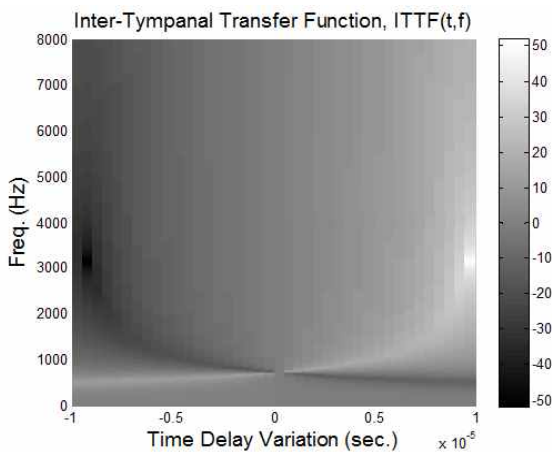


그림 7. 방향 감지를 위한 ITTF 크기 응답.

Fig. 7. Magnitude response of desired ITTF for estimation of sound source direction.

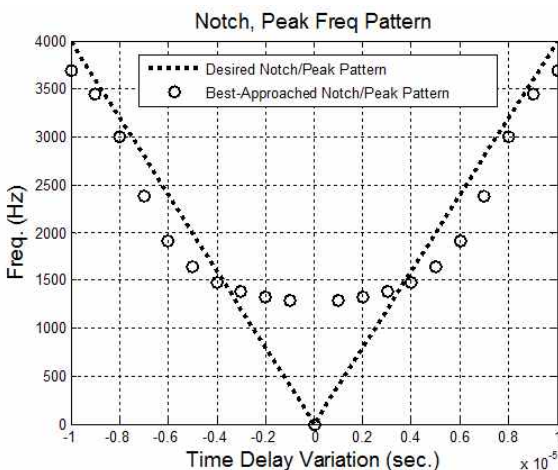


그림 8. 방향 감지를 위한 ITTF 크기 응답.

Fig. 8. Magnitude response of desired ITTF for estimation of sound source direction.

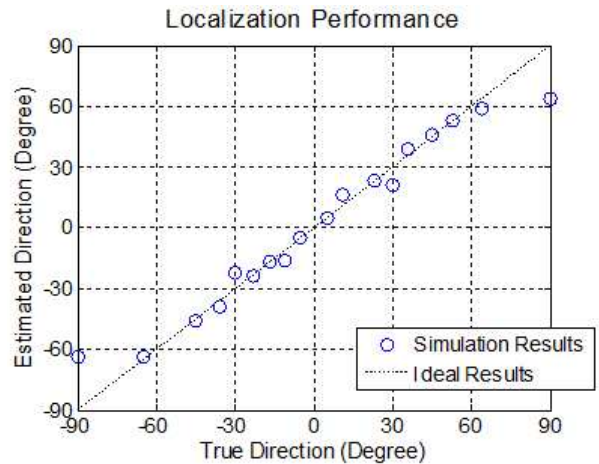


그림 9. 음성신호의 방향 감지 시뮬레이션 결과.

Fig. 9. Estimation performance for voice signal by using simulation model (desired ITTF).

4. 음성을 대상으로 한 방향 감지 성능

4절에서는 3절을 통해 생성된 ITTF를 이용하여 방향 감지 성능을 살펴보도록 한다. 이 성능은 MATLAB 시뮬레이션 결과를 통해 나온 결과이며 이 때 사용되는 신호는 녹음된 사람의 음성신호를 적용하였다.

ITTF의 크기 응답을 이용한 음원 방향 감지 기술은 다음과 같다. 1) 방향에 따라 존재하는 notch 또는 peak의 주파수를 데이터베이스로 획득을 한다. 2) 측정된 ITTF의 notch 또는 peak의 주파수를 데이터베이스 주파수와 비교하여 방향을 감지한다.

그림 9에서는 측정된 peak 또는 notch 주파수를 데이터베이스 주파수와 비교하여 최종적으로 측정되는 방향을 표현하였다. 그림 9의 결과를 통해 주파수를 비교하는 것만으로도 방향 감지가 가능한 것을 알 수 있다.

V. 결론

1. 기계적 결합구조를 가진 방향 감지 센서

본 연구는 파리(ormia ochracea)가 가진 청각 구조를 이용하여 음성 방향 감지 기술에 관한 내용이다. 파리는 여러 다양한 생물체 중에서 청각 기관의 크기에 비해 상대적으로 큰 파장의 소리를 들을 수 있는 대표적인 생체로서 파리의 청각 기관과 같은 기계적 결합구조는 생체 모방형 방향 감지 센서의 개발에 적용될 수 있다. 기존의 방향 감지에 사용하는 방법들을 아주 작은 크기(miniature)의 마이크로폰 어레이에 적용을 할 경우, 낮은(poor) 감지 성능을 보이지만 제시된 모델과 같이 기계적 결합 구조를 가진 구조를 제작하여 사용한다면 ITTF의 크기 응답만을 이용하여 실제 방향 감지에도 적용이 가능할 것이다. 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 이용하여 ITTF의 크기 응답만을 이용한 음성 방향 감지과정을 제시하였다.

2. ITTF 생성

ITTF (Inter-Tympanal Transfer Function)는 양쪽에 위치한 tympanal membrane 변위간의 전달함수로 기계적 결합 구조를 형성하는 요소들의 물성치에 의해 정해진다(그림 3-6

참고). 특히 peak와 notch들의 변화양상을 물성치의 변화를 통해 조절할 수 있다. 본 논문에서는 방향 검지를 위한 최적의 ITTF를 monotonically increasing peak와 monotonically decreasing notch를 가지는 크기응답으로 정의를 하였고 식 (14)에서의 목적함수를 바탕으로 정의된 모델에서의 최적의 물성치를 정하는 과정을 보였다. 이러한 최적의 ITTF는 적용 환경, 목적에 따라서 변경될 수 있으며 최적의 ITTF가 정의가 된다면 식 (14)와 같은 목적함수를 사용하여 최적의 물성치들을 찾을 수 있다. 이러한 방식의 센서 설계방법은 주어진 모델을 기반으로 다양한 응용분야에 적용될 수 있을 것이다.

3. 모델의 대칭/비대칭에 대한 고찰

본 논문에서는 로봇에 적용을 위한 목적으로 방향 검지 센서 설계법을 제안하였다. 이를 위하여 좌우 대칭적인 검지 성능을 요구하도록 최적의 ITTF가 정의되었기에 (식 (13) 참고) 비대칭 모델에 대한 parameter searching이 이루어지더라도 최종적으로 대칭적인 물성치를 가지게 된다. 결과적으로 본 연구에서는 좌우 대칭적인 ITTF의 구현을 위하여 모델의 비대칭성에 대해서는 고려할 필요가 없었다. 하지만, 음환경과 사용 목적 등에 의하여 좌우 비대칭적으로 선정되는 경우에는 최적의 ITTF를 표현하기 위하여 비대칭 모델에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

4. 제안된 모델의 Sensitivity에 대한 고찰

이론적인 접근방식과 달리 모델을 실제로 제작하고 그 센서를 음환경에 적용하기 위해서는 모델이 가진 민감도 (단위 음압 당 변위, Displacement/Pressure)가 높아야 한다. 기존의 제시된 파리의 청각 구조에 기반한 마이크로폰 다이어프램 제작 및 방향 검지 방식의 경우, 프레임의 변위를 측정하기 위하여 laser vibrometer를 이용하였다[15,16]. 이러한 방식은 실제 적용을 위해서는 비효율적인 방식이다. 따라서 모델이 가지는 민감도를 증가시킬 필요성이 있으며 이를 기반으로 제작과정에서 발생하는 민감도 loss를 보상할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*, MIT Press Cambridge, Massachusetts, 1983.
- [2] M. S. Brainstein, "A framework for speech source localization using sensor arrays," Doctoral Dissertation, Brown University Providence, USA, 1995.
- [3] J. M. Valin, F. Michaud, J. Rouat, and D. Letourneau, "Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot," *Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, vol. 2, pp. 1228-1233, Oct. 2003.
- [4] S. Hwang, Y. Park, and Y. Park, "Sound direction estimation using an artificial ear for robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 3, pp. 208-217, 2011.
- [5] J. Hornstein and M. Lopes, "Sound Localization for humanoid robots - building audio-motor maps based on the HRTF," *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, pp. 1170-1176, Oct. 2006.
- [6] J. C. Chen, K. Yao, and R. E. Hudson, "Source localization and beamforming," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 30-39, 2002.
- [7] Z. M. Fuzessery, P. Buitenhoff, B. Andrews, and J. M. Kennedy, "Passive sound localization of prey by the pallid bat (*Antrozous p. pMlidus*)," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 171, no. 6, pp. 767-777, 1993.
- [8] A. S. Feng, H. C. Gerhardt, and R. R. Capranica, "Sound Localization behavior of the green treefrog (*hyla cinerea*) and the barking treefrog (*H. gratioiosa*)," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 107, pp. 241-252, 1976.
- [9] H. C. Gerhardt and J. Rheinlaender, "Accuracy of sound Localization in a miniature dendrobatid frog," *Naturwissenschaften*, vol. 67, no. 7, pp. 362-363, 1980.
- [10] F. Gilbert and N. Elsner, "Directional hearing of a grasshopper in the field," *Journal of Experimental Biology*, vol. 203, pp. 983-993, 2000.
- [11] D. Robert, M. P. Read, and R. R. Hoy, "The tympanal hearing organ of the parasitoid fly *Ormia ochracea* (Diptera, Tachinidae, Ormiini)," *Cell Tissue Research*, vol. 275, no. 1, pp. 63-78, 1994.
- [12] D. Robert, R. N. Miles, and R. R. Hoy, "Directional hearing by mechanical coupling in the parasitoid fly *Ormia ochracea*," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 179, no. 1, pp. 29-44, 1996.
- [13] R. N. Miles, D. Robert, and R. R. Hoy, "Mechanically coupled ears for directional hearing in the parasitoid fly *Ormia ochracea*," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, no. 6, pp. 3059-3070, 1995.
- [14] J. Huang, N. Ohnishi, and N. Sugie, "A biomimetic system for Localization and eparation of multiple sound sources," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, vol. 44, no. 3, pp. 733-738, 1995.
- [15] L. Tan and R. N. Miles, "Response of a biologically inspired MEMS differential microphone diaphragm," *Proceedings of the SPIE AeroSense*, Orlando, USA, pp. 4743-15, 2002.
- [16] Q. Wang, Z. Rao, and N. Ta, "Bionic structure of mechanically coupled diaphragms for sound source localization," *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 8, no. 7, pp. 855-865, 2009.
- [17] I. Kim, H. Choi, K. Yi, J. Choi, and S. Kong, "Intelligent visual surveillance - a survey," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 926-939, 2010.
- [18] S. Suh and Y. Kang, "IA robust lane recognition techni-

que for vision-based navigation with a multiple clue-based filtration algorithm,” *International Journal of*

Control, Automation, and Systems, vol. 9, no. 2, pp. 348-357, 2011.



이 상 문

2007년 KAIST 기계공학과 졸업. 2009년 동 대학원 석사 졸업. 2009년~현재 KAIST 기계공학과 구조동역학 및 응용제어 연구실 박사 과정. 관심분야는 음향 신호 처리, 3차원 입체음향기술, 생체모방기술.



박 영 진

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1987년 University of Michigan 박사. 1987년~1988년 University of Michigan Research Fellow. 1988년~1990년 New Jersey Institute of Technology Assistant Professor. 1990년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 자동 제어, 3차원 입체음향, 능동 소음 및 진동 제어, MR 유체, 차량의 안정성 제어, 차량의 고장진단, 제어이론, 강인제어, 시스템 규명.