

사막 전갈의 진동 감지 행동을 모델로 한 진원지 방향 추정 기법

Detecting the Direction of Vibration Inspired by Prey Detection Behavior of Sand Scorpions

정은석, 김대은*
(Eunseok Jeong¹ and DaeEun Kim¹)
¹Yonsei University

Abstract: Sand scorpions are nocturnal animals to mostly use tactile senses to detect their prey. It has been reported that sand scorpions have high vibration sensitivity for their prey-localizing behavior. We tested vibration experiments in the sand with microphone sensors to model the sand scorpion's behavior and a time-difference model was applied to find the direction of a vibration source. Using the information of the arrival time of the vibration signal to reach each leg position, we can find the location of the vibration source.

Keywords: sand scorpions, sensor, epicenter estimation, vibration

I. 서론

최근에 동물의 행동이나 습관을 기반으로 한 생체 모방 연구들이 많이 이루어지고 있다. 특별히 동물의 생태 기반 기술에 대한 연구는 사람이 다룰 수 없는 영역의 활용이나 사람에게 도움을 줄 수 있는 분야에 응용이 되고 있고, 센서를 기반으로 한 연구들이 주로 진행되어 왔다. 박쥐의 먹이 탐지를 모방하여 초음파 센서로 물체 위치를 추정하는 알고리즘[1,2] 파리나 벌과 같은 곤충들의 광학흐름을 기반으로 한 시각 센서 네트워크 [3], 개미, 농게와 같이 자신의 주변의 랜드마크를 이용하여 집의 위치를 알아내는 알고리즘[4-7], 전기장의 변화를 통하여 주변의 물체나 먹이를 감지하는 전기 물고기 전기 감지 (electrolocation) 방식 [8,9], 쥐의 수영을 모델로 한 물체의 위치와 모양 인식 [10]과 같은 여러 가지 연구들이 이루어져왔다. 특히 위의 같은 생태 모델 연구의 대부분은 주변 물체의 위치를 추정하거나 이를 이용하는 것과 관련이 있고, 그러한 과정은 동물 생태에서 중요한 메카니즘이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 사막이라는 환경 속에서 사막 전갈이 다른 감각 센서를 이용하여 즉 진동을 감지하여 물체의 진원지 방향을 추정하는 것을 모델로 한다.

사막과 같은 환경에서 동물들은 낮에 활동을 하는 것이 매우 힘들다. 한여름 낮의 사막과 같은 환경의 온도는 40~50도이며 특별히 작은 곤충과 같은 동물들이 사는 모래 표면 온도는 종종 70도를 넘으며 상대습도는 0에 가까워

생존에 치명적인 위협이 되는 환경임을 알 수 있다. 그래서 사막에서는 많은 동물들이 온도가 매우 높은 낮보다는 온도가 많이 내려간 밤에 주로 활동을 많이 하며, 낮에는 그늘이나 모래 속에 숨어서 높은 온도의 환경을 피하며 지낸다. 그런 이유로 사막에 사는 동물들은 빛이 없는 환경 가운데 활동을 해야 하며, 그로 인해서 시각적인 정보는 사막에 사는 동물들의 생태 환경에서 전혀 도움이 되지 않는다. 그래서 이들은 다른 감각들을 통하여 시각을 대신하는 것을 볼 수 있으며 그 중 특히 사막 전갈과 같은 동물은 시각을 대신하여 모래로 전달되는 진동을 사용하며 진동을 통해서 먹이를 추적한다[11,12].

사막 전갈이 사는 환경인 모래는 탄성이 있는 매질로서 진동을 전달하는데 있어 좋은 특성을 가지고 있다. 일반적으로 지면에서 진동은 4가지 종류의 파형으로 전달이 되는데 실체파(body wave)라 불리는 P-파(primary wave), S-파(secondary wave)와 표면파(surface wave)라 불리는 레일리파(rayleigh wave)와 러브파(love wave)가 있다[13]. P-파는 진행방향의 앞, 뒤로 진동하는 파형을 가지며, 느슨한 모래에서는 120 m/s, 조밀한 모래에서는 200 m/s의 속도를 보이며 구의 형태로 땅속에 전달된다. S-파는 진동의 진행방향의 수직방향인 위, 아래로 진동하며 P-파와 같이 구의 형태로 전달되나, 모래와 같은 고운 입자의 매질에 대해서는 잘 드러나지 않는다. 레일리파는 땅의 표면에 전달되는 파형을 가지며 매질 입자의 움직임이 진동의 방향에 역행으로 타원의 모양을 그리며 진행되는 파형을 보인다. 진행속도는 마른 모래에서 40~50 m/s 정도로 P-파보다 느리게 전달된다. 러브파는 진동의 진행방향과 수직이며 지표면에 수평으로 전달되는 파로 땅의 표면과 땅 속의 매질의 성질이 다를 때 일어나는 진동으로 나타난다. 모래에서의 진동에 대한 실험에서는 보통 속도가 빠른 P-파와 속도가 느린 레일

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 23., 수정: 2012. 7. 26., 채택확정: 2012. 8. 26.

정은석, 김대은: 연세대학교 전기전자공학부

(eunseok.jeong@yonsei.ac.kr/daeun@yonsei.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0001626).

리파가 주로 관측된다. 물리학적인 관점으로는 공기나 물 같은 탄성을 가진 매질보다는 크고 단단하며 비탄성인 매질에서 진동 전달이 잘 되는 것으로 알려져 있으나, 모래는 공기와 물과는 다르게 표면으로 전달되는 진동의 크기를 크게 감쇠시키지 않고 전달할 수 있다[12,14].

P-파는 거리 R에 따라 $1/R$ 의 감쇠율을 가지며 그로 인해 먼 거리에서 오는 파형이 짧게 나오는 것을 볼 수 있고, 보통 2000 Hz 미만의 비교적 높은 주파수의 진동으로 관측된다. 그에 비해 레일리파는 거리 R에 따라 $1/\sqrt{R}$ 의 감쇠율을 가지며 그로 인해 파형이 상대적으로 오래 지속되는 것을 볼 수 있고, 300~400 Hz의 비교적 낮은 주파수의 진동으로 관측된다. 다른 종류의 진동보다 레일리파는 감쇠율이 낮아 진원지와 거리가 멀어도 진동을 감지하기가 쉽고, 느린 전달 속도와 낮은 주파수의 진동으로 인하여 진동을 이용하는 동물들이 감지하며 사용하기에 좋은 특성을 가지고 있다[11,12,14,15].

Brownell은 사막 전갈이 모래에서 전달되는 진동 중 P-파와 레일리파 둘 다 감지할 수 있으며 각각의 파형에 따라 몸체의 다른 부위를 통하여 진동을 감지하게 된다고 설명하였다[11,12]. Brownell에 의하면 P-파는 사막 전갈의 발에 달려있는 털들에서, 레일리파는 사막 전갈의 발목부위에 있는 BCSS (Basitarsal Compound Slit Sensilla) 기관에서 감지가 되어 신경에 전달된다. 만약 사막 전갈의 진동을 감지하는 부위 중 몇몇 다리의 BCSS를 제거하였을 때, 진원지의 각도 추정을 잘 하지 못하고 일정하게 고정된 각도로만 반응을 하는 것을 볼 수 있는데, 그것은 사막 전갈이 진동을 이용한 진원지의 각도 추정을 위해 다른 감각 부위를 사용하기 보다, 각각의 다리 8개($\pm 18^\circ$, $\pm 54^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 140^\circ$)에 있는 BCSS들을 이용하여 진원지 방향 추적을 하는 것임을 알 수 있다. 또한 Brownell은 사막 전갈이 진원지의 거리 추정 능력에 있어서도 탁월한 능력을 보이며 전갈과 15 cm의 거리에 떨어진 진원지에 대하여 평균 14.54 cm, 표준편차 0.97 cm로 정확한 거리추정이 가능함을 보여주었다[11]. 이 전까지 사막 전갈의 진원지 방향 추정에 대해서는 연구가 많이 진행되었으나 아직 진원지의 거리추정에 있어서 어떤 방법을 사용하는지 확실한 연구는 진행되지 않았다.

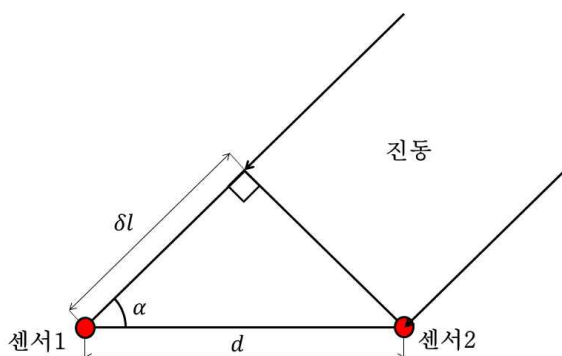


그림 1. 삼각법을 통한 각도 추정. 진동은 직선 파면을 가지는 것으로 가정.

Fig. 1. Trigonometry of angle estimation. It is assumed that the vibration wave has a plane wavefront.

진동을 이용한 진원지 추정 방법에는 주로 시간차에 의한 방법을 이용하게 된다. 여러 개의 센서를 가지고 진동을 측정하게 되면 각각의 센서마다 진동이 도착하는 시간이 다리의 위치에 따라 다르게 나타나게 될 것이다. 이런 각 센서마다의 진동 도착시간을 통하여 삼각법을 이용해 진동의 진원지 각도를 추정할 수 있다. 그림 1과 같이 두개의 센서가 d 라는 거리를 가질 때, 각도 α 에서 직선 파면을 가진 진동이 전달되며, 매질 위에서의 진동의 속도 c_{est} 를 알고, 시간차 δt 를 알게 되면 다음과 같은 식을 구성할 수 있다[16].

$$\cos \alpha = \left(\frac{\delta l}{d} \right), \delta l = c_{est} \delta t$$

이러한 방법을 통하여 진원지 방향 각도를 추정할 수 있으며 최소 3개의 센서만으로도 각도를 정확히 추정할 수 있다. 하지만 매번 마다 전달되는 진동의 속도를 알 수가 없으며 진동의 속도가 일정하지 않기 때문에 오차가 일어나게 된다. 따라서 이 방법으로 진원지의 각도 추정을 한다면 진동의 정확한 속도를 가정하는 것이 매우 중요하며, 주로 직접 매질의 진동의 속도를 측정하는 방법을 이용하거나[17], 슬라이딩 윈도우 알고리즘을 통하여 테이블로 구성된 진동의 전달 속도마다 계산하여 추정한 거리 결과들의 비교를 통함으로써, 진동의 속도에 가까운 값을 선택하는 방법을 이용하기도 한다[16]. 본 논문에서는 사막 전갈의 신경망 모델을 기반으로 시스템을 구성하여 진동의 전파속도를 알지 않아도 진원지의 방향을 추정할 수 있는 알고리즘 [18]을 이용하였다. 기존의 방법으로는 실험환경에 따라 진동의 전파 속도가 변하게 되어 진원지의 방향을 추정하는 것이 어려운 점이 있지만 본 연구에서는 신경망의 각각의 뉴런에 점수가 주어짐으로 인해서 방향을 추정하는 방식으로 진동의 전파속도에 상관없이 진원지의 방향을 정확히 추정할 수 있다.

사막 전갈의 신경망을 모델링하여 진원지의 방향을 추정하는 연구는 많은 곳에서 진행되어져 왔다. 주로 Brownell의 사막 전갈에 대한 연구에 기반하여 진원지 방향 추정에 대한 신경망 모델[11,12,18]을 구성하는 것으로 되어있다. 이러한 연구들은 실제 환경인 모래 위에서 이를 실험한 경우는 없었다[12,18,19]. 본 논문의 연구는 사막 전갈의 진원지 방향추정을 위한 신경망 모델을 이용하여 실제 모래 위에서 센서로 받아들여지는 진동을 가지고 진원지의 방향추정을 하는 것을 주 목적으로 하였다. 또한 이를 통하여 진동의 전파 속도를 구하지 않아도 간단한 알고리즘을 가지고 진원지를 추정할 수 있는 시스템을 구성할 수 있다.

II. 측정 도구 및 실험 방법

1. 센서 선택

실험을 하기 위해 앞서서 실험에 사용할 센서를 선택하기 위해서 테스트를 진행하였다. 5가지 센서를 두고 진동에 따른 출력의 결과를 분석했는데, 콘덴서 마이크(CMP-762), 피에조 패시브 부저, 엽전형 피에조 센서, 1축 가속도 센서(ADXL103CE), 진동 변환기(Knowles bu-217)를 사용하여 각

표 1. 센서들의 장단점 분석결과.

Table 1. Merits and demerits of the vibration sensors.

	장점	단점
콘덴서마이크	S/N비가 높음	고역주파수노이즈
피에조 패시브 부저	설치가 쉬움	120HZ노이즈
엽전형 피에조 센서	S/N비가 높음	직류성분
1축 가속도 센서	설치가 쉬움	S/N비가 낮음
진동 변환기	설치가 쉬움	S/N비가 낮음

각의 센서마다 모래 위에서 실험을 한 뒤, 그 중 성능이 가장 좋은 센서를 택하여 회로를 구성하는 것으로 하였다. 센서의 테스트는 각각의 센서를 모래 위에 고정시키고 일정한 이득을 가진 앰프를 연결하고 센서로부터 40 cm 떨어진 곳에 일정 높이 위에서 쇠공을 떨어뜨려 진동을 만들어 내어, 센서들에 전달된 진동에 대하여 어떻게 감지를 하는지 DAQ를 이용하여 측정하는 방법으로 진행하였다.

콘덴서 마이크는 2.5k Hz의 노이즈 성분이 있었지만, 주어진 진동에 대해서 잘 반응하는 결과를 볼 수 있었다. 피에조 패시브 부저는 센서의 설치가 비교적 쉬운 편이고 진동에 잘 반응하였지만 120 Hz의 노이즈 성분이 섞여 있어, 세기가 약한 진동을 측정하는 데 있어서 어려움이 있었다. 엽전형 피에조 센서는 진동을 측정할 때마다 편류 현상이 일어났고 그로인해 직류성분이 생기게 되어서 제대로 된 진동의 파형을 얻는 데에 어려움이 있었다. 그리고 1축 가속도 센서나 진동 변환기는 S/N ratio가 낮고, 주어진 진동에 대한 감도가 낮기 때문에 더 높은 이득이 필요했으며, 그에 따라 배경 노이즈가 진동을 측정하는데 있어 방해될 만큼 크게 나오게 되었다. 먼저 주어진 진동에 대해서 감도가 좋은 콘덴서 마이크와 피에조 패시브 부저를 이용하여 센서를 제작하였으며 노이즈에 대하여 저역 필터를 구성하여 제거하는 것으로 설계하였다. 콘덴서 마이크에 들어오는 2.5k Hz의 노이즈는 일반적인 레일리파(300~400 Hz)와 확실히 구분되어 저역 필터를 통해서 제거할 수 있지만, 피에조 패시브 부저에서 나오는 120 Hz의 진동은 레일리파와 구분이 쉽지 않아 필터로 노이즈를 제거하기에 어려움이 있었다. 그래서 최종적으로 콘덴서 마이크를 사용하여 진동을 감지하는 센서를 설계하고 회로를 구성하였다.

2. 회로 구성

회로는 전체적으로 그림 2와 같이 설계되었다. 전원으로는 리튬폴리머 전지를 이용하여 2셀씩 2개의 7.4V 전원을 구성하였으며 컴퓨터용 디바이스에 들어가는 저전압 강하정류기인 LM1115를 이용하여 각각 +5V와 -5V로 일정한 전압을 낼 수 있도록 하였다. 진동 신호의 증폭을 위하여 AD620칩을 이용, 앰프를 구성하였으며 회로에 가변저항을 이용하여 AD620의 이득을 조절할 수 있도록 하였고 출력단에 RC회로를 구성하여 저역필터를 설계하였다. 수신부는 지름이 12.5 mm이고 길이가 75 mm인 알루미늄 파이프를 이용하여 다리를 만들어 모래에 꽂아 고정될 수 있도록 하였다. 다리 끝에는 고무 캡을 씌워 모래가 콘덴서 마이크나 회로에 들어가지 못하면서 진동은 콘덴서 마이크로 전달될 수 있도록 하였으며, 모래 속으로의 고정을 용이하게 하였다. 콘덴서 마이크는 BSE사의 CMP-762라는 제품을 사용하

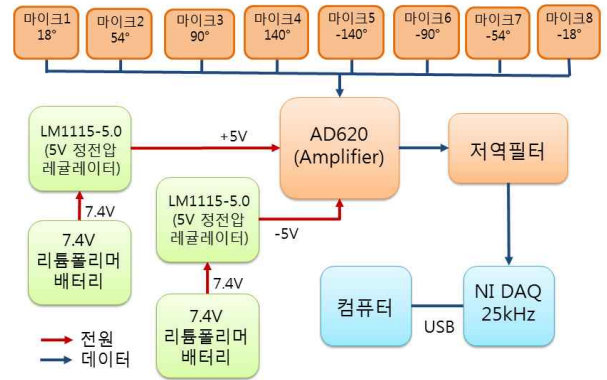


그림 2. 진동 감지 회로의 블록 다이어그램.

Fig. 2. Block diagram of vibration detecting circuit.

였다. 감도가 -42 dB이며, 신호 대 노이즈비가 60 dB 이상의 특성을 가진 콘덴서 마이크를 사용하여, 노이즈에 강하며, 원하는 진동신호를 잘 감지할 수 있도록 하였다. 회로와 센서 간에 다른 전선보다 비교적 유연한 4극 이어폰용 잭으로 연결하여, 센서에 전달되는 진동이 덜 감쇠되도록 하였고, 각 다리마다 앰프 회로를 내장하여 고정시키고 +5V, -5V, GND, 신호 라인을 연결하는 방식을 통하여 콘덴서 마이크와 앰프회로 사이를 최소화하여 선으로 들어오는 노이즈에 대하여 강한 특성을 가지게 하였다. 측정에는 NI (National Instruments)의 DAQ (USB-6210)보드를 사용하였고, 25k Hz의 샘플링 주기로 데이터를 받아들이도록 하였다.

3. 실험 방법

실험 방법에 있어서는 그림 3과 같이 구성하였다. 먼저 전갈의 각 다리 각도와 같은 구성을 하는 형태로 10 cm를 지름으로 하는 원 안에 8개의 각도(±18도, ±54도, ±90도, ±140도)에 해당하는 곳에 센서를 부착한 다리를 세워두었다. 그 다음 일정한 각도와 거리 뒤에 쇠 공(112g)을 일정 높이 이상에서 떨어뜨려 모래에 진동을 만들어내게 하였다. 모래를 통하여 전달되는 진동은 각 8개의 다리의 센서에 감지가 되며, 그 진동은 각각의 센서의 마이크에 들어가 전



그림 3. 8개의 마이크 진원 센서를 이용한 실험 사진.

Fig. 3. Experimental setup with eight microphone sensors.

기적인 신호로 바뀌게 된다. 각각의 센서에서 만들어진 전기적 신호들은 AD620이라는 앰프를 통하여 증폭이 되게 되며, 이후 출력 단의 저역필터를 통하여서 일정 차단주파수 이하의 신호만 출력되게 된다. 증폭과 필터를 거친 각각의 진동 신호들은 최종적으로 DAQ 보드에서 25KHz의 샘플링 주기로 받아들여지게 되며, 컴퓨터를 통하여 그 진동 신호를 시간에 대하여 분석할 수 있게 된다. 각각의 다리마다 들어온 신호들을 DAQ 보드를 통하여 저장하게 되고, 그 데이터를 가지고 각도추정 알고리즘에 따라 진원지의 방향 추정을 하게 된다.

4. 각도 추정

진동이 전달되면 각 8개의 다리에 부착된 센서에서 진동을 감지하게 되고, 각각의 센서가 진동을 감지하게 되는 시간을 통하여 진동의 각도 ϕ_s 를 추정할 수 있다. 진동이 전갈의 전면부 중심으로부터 떨어진 각도 ϕ_s 에서 올 때, 진동을 받아들이는 k번째 다리와 l번째 다리는 그 진동을 감지하게 되는 시간을 가지게 된다. 전갈의 전면부 중심로부터 각 다리의 각도 γ_l, γ_k 와 각 센서들이 구성하는 외접원의 지름 R과 모래에서의 진동의 전파속도 v_R 을 통하여 다음 식에 따라 진동의 근원지 각도 ϕ_s 를 구할 수 있게 된다[12,18].

$$\Delta t(\gamma_k, \gamma_l | \phi_s) = R/v_R [\cos(\phi_s - \gamma_l) - \cos(\phi_s - \gamma_k)]$$

위 식에서 지름과 진동의 전파 속도는 특정한 값으로 일정하게 고정되었다고 가정했을 때, 각 다리마다 진동을 감지한 시간차와 각 다리의 각도만을 가지고 진원지의 각도 ϕ_s 를 구할 수 있다. 이와 같은 식을 통해 각 다리들의 각도들의 진동을 받아들인 시간의 차이를 통하여 진원지의 각도 ϕ_s 를 더 정확히 구할 수 있으며, 각도들과 시간차에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 다음 식과 같이 진원지의 각도 ϕ_s 를 시간차에 의하여 생기는 각 다리에 대한 진동 점수와 각 다리의 각도를 복소함수로 구성하여 계산한다[18].

$$ze^{i\phi} = \sum_{k=1}^m z_k e^{i\phi_k} = x + yi \tag{1}$$

$$x = \sum_{k=1}^m z_k \cos(\phi_k) \quad y = \sum_{k=1}^m z_k \sin(\phi_k) \tag{2}$$

$$\phi = \arctan(y/x) \quad z = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3}$$

ϕ 는 진원지의 방향으로, 다리에 따른 진동 점수를 z_k ($m=8$)라 두고, 다리의 각도를 ϕ_k 라고 두어 각각의 다리의 점수와 각도의 관한 식을 (1)식과 같이 표현할 수 있다[18]. (1)식에서 $ze^{i\phi}$ 은 오일러의 공식을 통하여 코사인과 사인 값에 허수가 곱해진 복소수 형태로 표현될 수 있으며, 이후 각 다리의 점수와 각도의 값에 따라서 (2)식과 같이 표현할 수 있다. (2)식을 통하여 x와 y의 값을 구할 수 있고, (3)식과 같이 진동의 근원지의 방향 각도 ϕ 를 x와 y의 값을 통하여 추정할 수 있다[18,19]. 따라서 본 실험에서 쓰인 알고리즘과 같은 경우 진동이 도착한 순서대로 각 다리에 점수

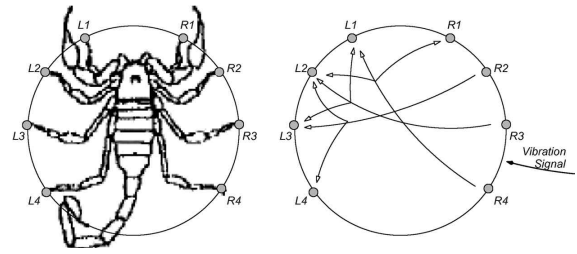


그림 4. 사막 전갈의 신경망 모델과 3개의 억제신호연결의 모식도 ([18]에서 발췌됨).

Fig. 4. Neural network model of sand scorpions and diagram of triad inhibitions (reprinted from [18]).

를 주되, 진동이 제일 늦게 도착한 다리의 시간과 각각의 다리에 진동이 도착한 시간과의 차가 각각의 다리의 진동 시간차 점수로 주어지게 된다. 예를 들어 2번 다리에 진동이 제일 먼저 도착하게 되었고, 그 뒤에 10 ms 간격으로 진동이 도착하게 되어 1번, 3번, 8번, 4번, 7번, 6번, 5번의 순서대로 도착하게 되었다면, 각 다리의 점수는 2번 70, 1번 60, 3번 50, 8번 40, 4번 30, 7번 20, 6번 10, 5번 0으로 결정되고 그에 따라서 각 다리의 각도와 점수를 위의 식들에 적용하여 최종적으로 진원지의 방향 각도를 구하게 된다.

Brownell이 제시한 신경망 모델에서는 그림 4와 같이 각 8개 다리에 대한 흥분 뉴런을 구성하고, 진동이 들어오는 방향과 근접한 다리를 K번째 다리라고 할 때, $\bar{k} = [(k+3), \text{mod} 8] + 1$ 식을 통하여 알 수 있는 진동방향의 반대편의 다리와 그 다리 주변의 왼쪽과 오른쪽, 3개에 대하여 억제 신호가 전달되도록 하였다[12]. 이를 응용하여 각도 추정에 있어서 3개의 억제 신호에 연결된 다리에 대해서 점수를 0으로 두고 나머지 5개의 다리에 대한 점수만으로 각도를 추정하도록 하였다.

III. 결과

실험은 두 가지 방법으로 진행되었다. 첫 번째 실험방법은 각도와 거리에 대해서 임의로 공을 떨어뜨리며, 모든 각도에 대하여 각도를 측정하여 추정 값과 비교하는 것으로 하였으며, 두 번째 실험 방법은 전면 0도를 중심으로 -180~180도에서 10도 간격으로, 30, 40, 50, 60 cm의 거리에 쇠공을 떨어뜨리는 것으로 진행되었으며, 두 번째 실험 방법의 경우 실제적으로 ± 3 도, ± 3 cm 정도의 오차를 가지고 공을 떨어뜨린 것으로 측정되었으며, 10도 간격의 고정된 값에 오차를 적용하여 측정값과 추정 값을 비교하였다. 진동을 추정하기에 앞서서 실험 장소에서 실험을 진행하여 데이터를 분석하는 과정에서, 각 센서마다 진동이 도착한 시간에 대한 데이터를 구하는 조건이 필요하였고, 그림 5와 같이 P-파는 파형에서 맨 처음 도달한 피크를, 레일리파는 파형에서 최댓값을 나타내는 피크를 포인트로 잡아 그 때의 시간을 가지고 각도 추정에 이용하였다. 레일리파를 이용하여 도착시간을 구하는 것은 굉장히 간단한 알고리즘을 이용하여 쉽게 구현이 가능하였으나, P-파의 파형을 잡아내는 데에 있어서는 어려움이 있어 P-파의 경우 직접 진폭이 큰 지점을 잡아 분석을 하였다.

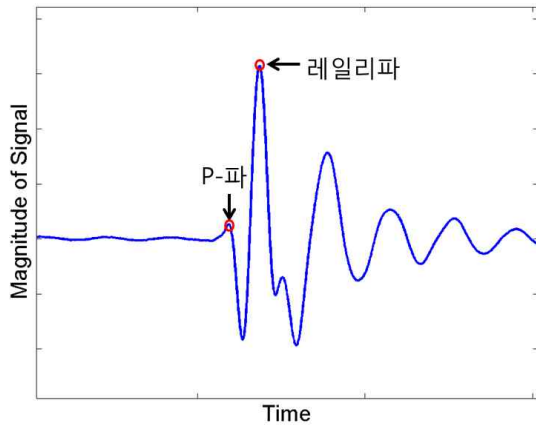


그림 5. P-파와 레일리파의 파형 분석.
Fig. 5. Wave form Analysis of P-wave and Rayleigh wave.

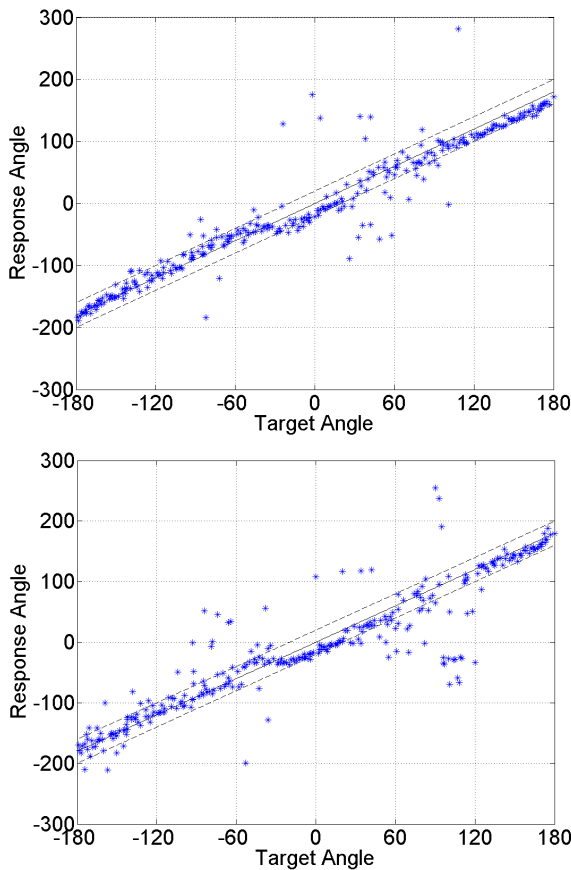


그림 6. P-파(위)와 레일리파(아래)를 이용한 각도 추정결과.
(실험의 각도와 거리는 임의로 정하여 실험하였다. 점선은 에러의 범위가 ± 20 도일 때를 의미한다).
Fig. 6. Angle estimation results using the P-Wave(up) and Rayleigh wave(down).

첫 번째 실험에서 우리는 P-파와 레일리파를 통한 각도 추정결과를 그림 6과 같이 얻을 수 있었다. 10도 간격에 8~9번씩 임의의 각도와 임의의 거리로 쇠공을 떨어뜨렸고, 총 304번의 실험을 진행하였다. 전체적으로 P-파를 통한 각도분석과 레일리파를 통한 각도분석에서 몇몇의 에러를 제

외하면 진원지의 각도를 비교적 정확히 추정할 수 있었다. P-파를 통한 진원지 방향 각도 분석 시 평균은 16.8509도, 표준편차는 24.7966도의 에러를 보이며 레일리파를 통한 진원지 방향 각도 분석 시 평균은 24.2839도, 표준편차는 35.6087도의 결과를 볼 수 있었다. 분석결과로는 P-파를 이용한 진원지 각도 추정 결과가 레일리파를 이용한 진원지 각도 추정 결과보다 더 좋은 것을 볼 수 있는데, P-파의 경우 파형을 보고 직접 P-파를 골라내서 시간차를 계산하였고, 레일리파는 컴퓨터를 통한 계산으로 최솟값에 해당하는 포인트를 골라내어 시간차를 계산하였기 때문에, P-파에서는 각 다리에 입력된 파형마다 동일한 위상(Phase)에서 진동 도착시간을 잡을 수 있었지만 레일리파의 경우 입력된 파형에서 반사된 진동의 입력이나 실험 장소의 바람 등의 노이즈로 인하여 동일한 위상에서 진동 도착시간을 잡지 못하는 경우도 있었다. 그로 인하여 레일리파를 이용한 진원지 각도 추정의 에러가 P-파를 이용한 진원지 각도 추정의 에러보다 더 많은 것을 볼 수 있다. 하지만 일부의 그러한 에러들을 제외하면 두 가지 추정방식 모두 진원지 방향 각도 추정에 있어서 올바른 각도를 추정하는 것을 볼 수 있었고, 이후 노이즈에 대한 원인을 제거하고 실험을 한다면 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

또한 실험결과를 분석하면서 각도 0도 근처를 중심으로 진원지 추정 각도의 분포가 실제 각도보다 약간 작게 나오는 현상을 발견할 수 있었는데 이러한 현상은 실제 전갈에서도 동일하게 나타나는 현상임을 알 수 있었다. Brownell은 사막 전갈의 생태습성을 관찰하면서 진동에 대하여 사막 전갈의 진원지 각도 추정반응을 보여주었다[11]. 이 결과에서도 동일하게 0도 근처를 중심으로 실제 진동이 일어난 방향보다 작은 각도로 추정하는 현상이 나타났으며, 사막 전갈의 반응과 우리의 실험결과가 비슷한 결과가 나오는 것을 알 수 있었다.

두 번째 실험에서 우리는 P-파와 레일리파를 통한 진원지 방향 각도 추정결과를 거리별로 그림 7과 같이 얻을 수 있었다. 전체적으로 첫 번째 실험결과와 같이 P-파를 통한 각도 분석과 레일리파를 통한 각도 분석에서 몇몇의 에러를 제외하면 진원지의 각도를 비교적 정확히 추정하는 것을 볼 수 있었고 Brownell의 실험에서의 전갈의 각도 추정결과와 같이 0도 근처를 중심으로 추정각도가 양쪽으로 쏠리는 현상이 나타남을 관찰할 수 있었다[11]. P-파를 통한 진원지 각도 분석 시 평균은 13.2365도, 표준편차는 12.4063도의 에러를 보이며 레일리파를 통한 진원지 각도 분석 시 에러의 평균은 26.9614도, 표준편차는 32.3536도의 결과를 볼 수 있었다. 또한 진원지와 각 8개의 센서들의 중심과의 거리(30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm)에 따라 진원지 방향 각도 분석의 결과를 알 수 있었고, 그 결과는 그림 8과 표 2에 나타내었다. 전체적으로 거리에 따라 각도 추정에 대한 에러들은 증가하였다. 일반적으로 P-파는 레일리파보다 거리에 대한 감쇠율이 높기 때문에, 그로인해 P-파를 이용한 진원지 방향 각도 추정이 레일리파를 이용한 진원지 방향 각도 추정 결과보다 더 에러가 증가하게 될 것으로 예상하였으나 P-파를 이용한 진원지 방향 각도 추정의 경우 거리

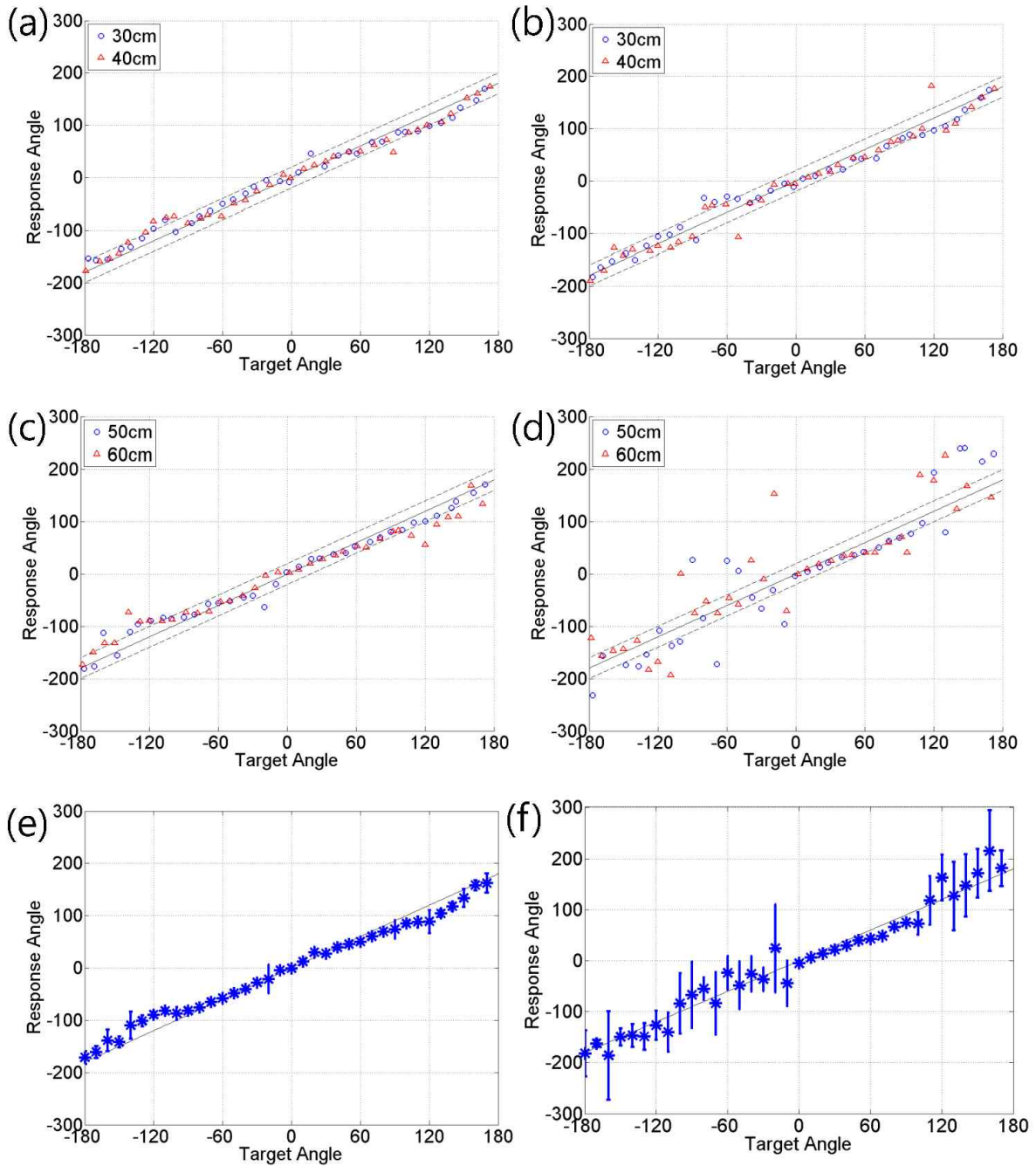


그림 7. 거리 변화에 따른 P-파[a, c]와 레일리파[b, d]를 이용한 각도 추정결과. (실험에서 각도는 10도 간격, 거리는 30~60 cm 로 이루어졌다. [a, b, c, d] 거리 별 각도 추정분포 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 점선은 에러의 범위가 ± 20 도일 때를 의미한다. [e, f] P-파와 레일리파를 이용한 각도 추정결과의 평균과 표준편차 분포)

Fig. 7. Angle estimation result using the P-Wave[a, c] and Rayleigh wave[b, d] depending on varying distances (a) 30cm (b) 40cm (c) 50cm (d) 60cm (e) mean errors of P-wave (f) mean errors of Rayleigh wave.

가 증가함에 따라 에러가 크게 변화되지 않으며 레일리파를 이용한 진원지 방향 각도 추정의 경우 거리가 증가함에 따라 에러가 크게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 진원지의 각도 추정이 측정된 진동의 크기에 따라 결정되는 것이 아닌, 시간차만으로 결정되어짐을 보여준다. 또한 레일리파의 경우 진원지와 센서와의 거리가 증가함에 따라, 다른 노이즈의 진동이 더 들어오기 쉬우며 진동이 왜

곡되기 쉽기 때문에 각 센서들의 진동의 도착 시간이 정확하게 측정하기가 쉽지 않게 된다. 그에 따라 진원지의 방향 각도 추정 결과가 에러가 큰 것으로 볼 수 있다. 하지만 40 cm까지의 각도 추정에 대해서는 에러평균 15도 이내 표준편차 15도 이내 정도로 비교적 정확히 진원지의 방향 각도 추정을 할 수 있으며 P-파의 진원지 방향 각도 추정결과와 크게 다르지 않았다.

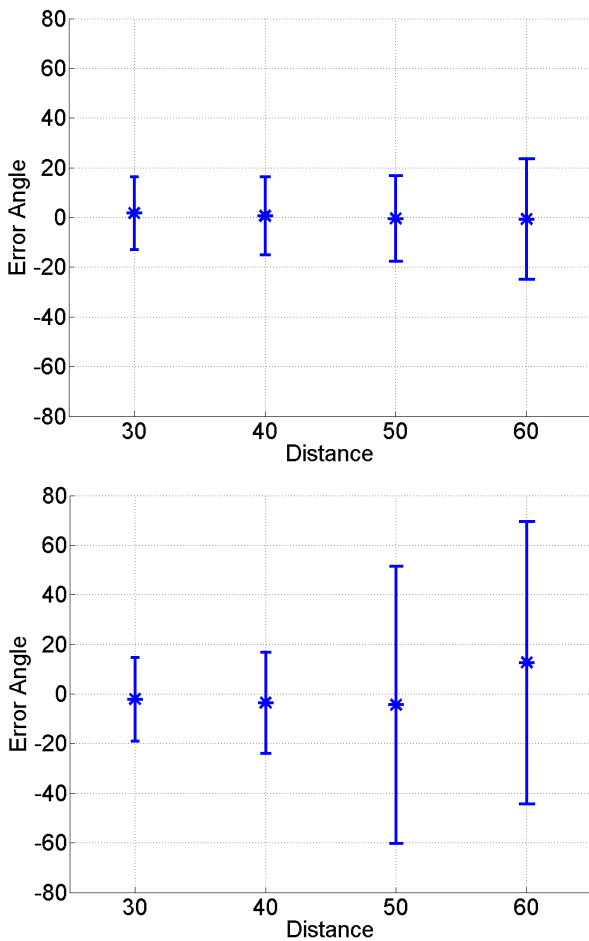


그림 8. P-파(위)와 레일리파(아래)를 통한 거리별 각도 추정 에러.

Fig. 8. Angle estimation error by distance using P-wave(up) and Rayleigh wave(down).

표 2. P-파와 레일리파를 통한 거리별 각도 추정 에러 (단위 도).

Table 2. Angle estimation error depending on distance using P-wave and Rayleigh wave.

거리	P-파		레일리파	
	평균	표준편차	평균	표준편차
30 cm	11.8479	8.4745	13.2579	10.3497
40 cm	10.8353	11.2286	14.8120	14.1943
50 cm	12.8567	11.2772	40.6695	37.9361
60 cm	17.4055	16.6687	39.1063	42.8838

IV. 결론

본 논문에서 우리는 사막 전갈의 먹이 추정 방식을 모방하여 진원지 방향 추정 기법에 적용하여 보았다. P-파와 레일리파를 이용하여 진동이 모래를 통해 각 다리의 센서에 도달하는 시간차를 통하여서 진원지에 대한 각도 추정을 할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 직접 마이크 센서를 이용하여 구성된 진동 측정회로를 통하여 모래에서의 진동이 어떻게 전달되는지 어떠한 파형을 가지고 있었는지 알 수 있었다. 또한 다리별 진동의 도착시간을 찾아내어 구

성된 신경망에 따른 계산을 통하여, 거리와 각도별로 진원지 방향 추정 결과가 어떻게 나타나는지 알 수 있었다. 특별히 이전의 진원지 방향 각도 추정 모델들과는 다르게, 모래에서의 속도에 대한 가정 없이 신경망 모델을 통하여서 간단하게 진원지 방향에 대한 각도 추정 알고리즘을 구성하고 실시간으로 진원지의 방향을 추정할 수 있음을 볼 수 있었다. 시뮬레이션을 통한 기존의 실험들과는 다르게 실제 센서를 구성하여 모래 위에서 실험을 하였고, 거리에 따라서 추정각도에 따른 에러가 증가하였지만 비교적 정확하게 진원지의 방향을 추정할 수 있는 진원지 추정시스템을 구성하였다.

본 논문에서 소개하는 사막전갈에 기반한 진원지 방향 추정기법은 사람이 감지하기 어려운 진동이라는 부분에 있어서 센서들의 구성과 알고리즘을 이용하여 사람에게 도움을 줄 수 있는 연구가 될 것이라 생각한다. 추후에 본 논문의 진원지 방향 추정 시스템을 이용하는 로봇을 만들어 네비게이션이나 군집로봇으로 응용될 수 있을 것이다. 또한 실험하는데 있어서 계속해서 모래 위에서만 실험한 부분이 있었는데, 모래 위에서 뿐만이 아니라 콘크리트 바닥이나 나무 바닥과 같은 다양한 환경에서도 동일하게 진원지 방향 추정이 가능하도록 시스템을 개선하는 것을 목표로 연구를 진행할 것이다.

참고문헌

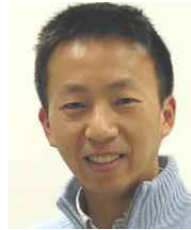
- [1] S. Park and D. Kim, "Ultrasound echolocation inspired by a prey detection strategy of big brown bats," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 3, pp. 161-167, 2012.
- [2] S. Park and D. Kim, "Distance estimation using discretized frequency synthesis of ultrasound signals," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 5, pp. 499-504, 2011.
- [3] Y. Cha and D. Kim, "Homing navigation based on path integration with optical flow," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 2, pp. 94-102, 2012.
- [4] S.-E. Yu and D. Kim, "Analysis on occlusion problem of landmark-based homing navigation methods," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 596-601, 2011.
- [5] S.-E. Yu and D. Kim, "Burrow-centric distance-estimation methods inspired by surveillance behavior of fiddler crabs," *Adaptive Behavior*, vol. 20, no. 4, pp. 273-286, 2012.
- [6] S.-E. Yu and D. Kim, "Image-based homing navigation with landmark arrangement matching," *Information Sciences*, vol. 181, no. 16, pp. 3427-3442, 2011.
- [7] S.-E. Yu and D. Kim, "Landmark vectors with quantized distance information for homing navigation," *Adaptive Behavior*, vol. 19, no. 2, pp. 121-141, 2011.
- [8] M. Sim and D. Kim, "Electrolocation of multiple objects

- based on temporal sweep motions,” *Adaptive Behavior*, vol. 20, no. 3, pp. 146-158, 2012.
- [9] M. Sim and D. Kim, “Electrolocation with an electric organ discharge waveform for biomimetic application,” *Adaptive Behavior*, vol. 19, no. 2, pp. 172-186, 2011.
- [10] D. Kim and R. Möller, “Biomimetic whiskers for shape recognition,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, pp. 229-243, 2007.
- [11] P. H. Brownell, “Prey detection by the sand scorpion,” *Sci. Amer.*, vol. 251, no. 6, pp. 94-105, 1984.
- [12] P. H. Brownell and J. L. van Hemmen, “Vibration sensitivity and a computational Theory for prey-localizing behavior in sand scorpions,” *American Zoologist*, vol. 41, no. 5, pp. 1229-1240, 2001.
- [13] B. A. Bolt, “Earthquakes,” W. H. Freeman and Company, New York, 1988.
- [14] B. Aicher and J. P. Tautz, “Vibrational communication in the fiddler crab, *Uca pugilator*. 1. Signal transmission through the substratum,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 166, no. 3, pp. 345-353, 1990.
- [15] P. M. Narins, “Seismic communication in anuran amphibians,” *BioScience*, vol. 40, no. 4, pp. 268-274, 1990.
- [16] A. Wallander, R. A. Russell, and K. Hyypä, “A robot scorpion using ground vibrations for navigation,” *Australian Conference on Robotics and Automation*, pp. 75-79, 2000.
- [17] M. S. Richman, D. S. Deafrick, R. J. Nation, and S. L. Whitney, “Personnel tracking using seismic sensors,” *Proceedings of SPIE*, 4393, pp. 14-21, 2001.
- [18] D. Kim, “Neural network mechanism for the orientation behavior of sand scorpions towards prey,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 17, no. 4, pp. 1070-1076, 2006.
- [19] S. V. Adams, T. Wennekers, G. Bugmann, S. Denham, and P. F. Culverhouse, “Application of arachnid prey localisation theory for a robot sensorimotor controller,” *Neurocomputing*, vol. 74, no. 17, pp. 3335-3342, 2011.



정은석

2011년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업. 2012년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정. 관심분야는 바이오로보틱스, 진동 및 음향 응용 시스템.



김대은

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업. 1993년 The University of Michigan, Ann Arbor, USA 석사. 2002년 The University of Edinburgh, UK, 박사. 2002년 Max Planck Institute for Human Cognitive & Brain Sciences, Cognitive Robotics, Research Scientist. 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수. 관심분야는 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생명, 신경과학, 인지과학.