

음향 렌즈를 이용한 선박용 기적소리 탐지장치

장 훈¹ · 김상훈² · 안병원[†]

(Received October 13, 2017 ; Revised November 20, 2017 ; Accepted February 9, 2018)

Sound reception system for a ship by an acoustic lens

Hoon Jang¹ · Sang-Hoon Kim² · Byong-Won Ahn[†]

요약: 메타 렌즈의 일종인 음향 룬버그 렌즈를 이용하여, 기존의 복수의 마이크로폰의 위상을 서로 비교하여 방향을 찾는 방식과 원리가 전혀 다른, 새로운 선박의 기적소리 측정 장치의 원리를 보였다. 이 렌즈는 음원의 반대 방향 가장자리에 초점을 맺으므로 음원의 방향을 복잡한 계산 없이 바로 알려준다. 이 장치는 선박의 기적소리의 방향뿐만 아니라, 선박이 멀어지는지 가까워지는지, 멀어진다면 어떻게 멀어지고 가까워진다면 어떻게 가까워지는지를 시각 신호를 통하여 확인할 수 있으므로 음향 레이더의 역할도 할 수 있다. 아크릴로 직경이 1.8 m인 2차원 원통형 모형을 제작하여 실내 측정을 통하여 초점의 형성을 확인하였다. 모형의 실제 측정은 실습선의 기적 음원으로부터 1.4 km 떨어진 지점에 음향 룬버그 렌즈를 두고 가장자리에 마이크로폰을 설치한 후, 증폭된 신호를 오실로스코프로 측정한 결과 구분 가능한 초점이 형성되어 이 장치의 실용화가 가능함을 보였다.

주제어: 음향수신장치, 메타렌즈, 기적소리, 룬버그 렌즈

Abstract: A sound reception system for a ship is suggested using an acoustic Luneburg lens, which is entirely different from the conventional method, where phase differences between whistle signals are compared. The Luneburg lens focuses the incoming sound wave on the opposite side of the lens. It then predicts the direction of the sound source directly without calculations. This new system can detect whether a ship is approaching or retreating, which is then indicated by a visual signal. This system could also be used for acoustic radar. A cylindrical two-dimensional sample acoustic lens of diameter 1.8 m was manufactured, and its focusing ability in both the laboratory and in the field was proven. In the field, the lens was positioned 1.4 km away from the sound source of the training ship, and microphones were installed around the edges of the lens. This procedure demonstrated that it could be used as a sound reception system.

Keywords: Sound reception system, Meta-lens, Ship whistle, Luneburg lens

1. 서론

모든 선박에는 레이더가 장착되어 주변 선박의 위치와 방향 등 움직임을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 짙은 안개로 인해 출항이 금지되고, 출항한 경우에도 선박의 안전사고를 야기할 가능성이 높다. 선박은 화물과 자체 무게로 관성이 커서 자동차처럼 쉽게 방향을 전환하거나 멈춰지지 않는다. 레이더로 다른 선박의 위치를 파악하므로 시야에 관계없이 항해가 가능하지만, 소형선박의 경우 반사 면적이 적어 식별이 어려워 해난사고로 이어지는 경우가 많다. 이와 같은 이유로 모든 선박에는 국제협약에 의하여 단음(1초)과 장음(4~6초)의 2가지 소리를 사용하여 주변 선박들에게 자신의 위치를 알림으로써 충돌사고를 미연에 방지하

는 기적소리 발생장치가 의무적으로 부착되어 있다[1]-[3].

항해사는 우천과 짙은 안개로 시야가 좋지 않을 경우, 다른 선박들이 내는 기적소리를 듣고 항해하는 선박들의 위치를 파악해야 하는데, 귀만 가지고 선박의 정확한 접근 방향을 파악하기 어렵다. 이를 보조하기 위한 기기로 음향 수신 장치(SRS, Sound Reception System)가 개발되어 사용되고 있는데, 그 원리는 수동 소나와 유사하다. 선박의 앞과 뒤, 그리고 양 옆에 마이크로폰을 설치하고, 각 마이크로폰으로 들어오는 소리의 위상을 상호 비교하여, 벡터 계산에 의하여 음원의 방향을 찾는 것이다[4]-[7]. 선박에서 사용이 가능한 음향 수신 장치가 갖추어야 할 요건은 국제해사기구 규정에 명시되어 있다[8].

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8246-2094>): Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo, 58628, Korea, E-mail: ds4cbt@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7214

1 Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: bh7206@naver.com, Tel: 061-240-7200

2 Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: shkim@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7204

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 논문에서는 최근에 연구가 활발한 메타 렌즈의 하나인 룬버그 렌즈를 음향학적으로 구현하여, 선박의 기적소리 방향을 탐지할 수 있음을 실내와 실외 실험을 통하여 보였다. 2차원 원통형 음향 룬버그 렌즈에 파동이 입사하면 렌즈 반대편 가장자리에 수차(aberration) 없이 정확히 초점을 맺는다. 따라서 초점에 흐르는 전류의 차이로부터 초점이 형성되는 지점을 인식하는 기기를 제작하여 항해사가 근무하는 선교에 설치하면 램프와 소리로 음원의 방향을 알 수 있다. 복수의 음향 렌즈를 설치하면 두 개의 방향이 만드는 각으로부터 음원의 거리도 알 수 있고, 기적소리가 가까워지면 램프가 점점 더 밝아지고 신호음도 커지며, 멀어지면 반대로 작동하기 때문에 음향 레이더로 사용할 수 있다.

2. 음향 룬버그 렌즈의 원리 및 실험장치

21세기 들어 활발하게 연구되는 분야의 하나인 메타 물질이란 자연에 존재하는 물질을 가지고 자연에 존재하지 않는 성질을 가지는 물질을 만드는 것을 통칭하여 이르는데, 그 중의 한 분야가 메타 렌즈다. 이들 중 룬버그(Luneburg)렌즈는 렌즈의 각 부분마다 굴절률(n , Refractive Index)이 다른 굴절률 변환 렌즈(GRAdient INdex lens, GRIN lens)의 일종으로서, 원형인 경우 굴절률이 다음처럼 반지름의 함수로 주어진다[9]-[12].

$$n = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (1)$$

R 은 렌즈 반지름이고 r ($0 \leq r \leq R$)은 렌즈 중심으로부터의 거리다. 렌즈 굴절률이 중심에서는 $\sqrt{2}$, 가장자리와 외부에서는 공기와 같은 1이다. 그러면 렌즈의 중앙은 굴절률이 커서 파동의 속력이 느려지고, 렌즈 가장자리는 굴절률이 작아 속력이 빠르기 때문에, 파동이 렌즈 반대편의 한 점에 수차 없이 완벽하게 모여 초점을 형성한다. 만일 파원이 복수이면 **Figure 1**처럼 복수의 초점이 형성된다. 이 전산 모사에 콤퓨터(COMSOL)를 사용하였다[13]. 파의 진행은 가역적이어서 렌즈 가장자리에서 만들어진 구면파는 렌즈를 떠나면 평면파가 되어 나가는데, 이는 이 렌즈를 능동 소나처럼 사용할 수 있는 원리를 제공한다.

이 렌즈의 성질은 전자기파나 음파를 비롯한 모든 파동에 공통된다. 파원이 움직이면 정확히 반대편에 형성된 초점도 동시에 움직이므로 파원이 움직이는 방향을 알 수 있다. 룬버그 렌즈는 초점의 방향성뿐만 아니라 입사 신호를 증폭하는 특성이 있어서 전자기파를 모으는 전자기 룬버그 렌즈가 안테나에 사용되고 있다[14]. 반면에 음향파를 모으는 음향 룬버그 렌즈는 아직 사용되지 않고 있다.

이 룬버그 렌즈를 음향학적으로 구현하고자 하는 연구는 1950년대부터 시작되었으나[15][16] 실제로 구현된 것은 최근이다[17][18]. 2차원 룬버그 렌즈의 모형은 원통형이고 3차원 룬버그 렌즈의 모형은 구형인데 굴절률 식은 (1)로서 동일하다. 기적소리 측정 장치는 2차원 모형을 사용한다.

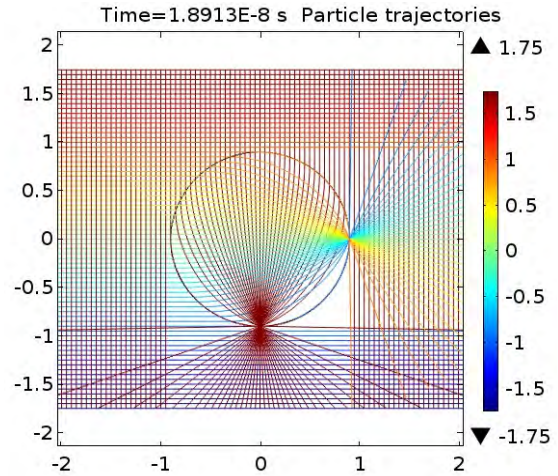


Figure 1: Dual focusing by Luneburg lens from dual optical sources (upper and left sides). The simulator is COMSOL Multi-physics 5.1.

초점이 형성되는 렌즈 가장자리에 음압을 인식하는 센서를 장착하고, 초점의 움직임을 항해사가 근무하는 선교로 전송하면, 항해사가 음원의 움직임을 복잡한 계산을 거치지 않고 실시간으로 알 수 있다.

전자기 룬버그 렌즈는 전자기파의 굴절률을 결정하는 두 가지 요소인 전기 유전율이나 자기 투자율을 변화시켜 제작하지만, 음향 룬버그 렌즈는 음향파의 굴절률을 결정하는 두 가지 요소인 밀도나 탄성계수를 변화시켜 제작한다. 음파의 굴절률은 음파가 통과하는 매질의 밀도(ρ)와 탄성계수(B)로 결정된다[17][18]. 탄성계수는 압력과 관계되는데 거의 상수이므로, 다음처럼 2차원 공간의 밀도만으로 굴절률이 결정된다.

$$n(r) = \frac{v_o}{v(r)} = \sqrt{\frac{\rho(r) B_o}{B(r) \rho_o}} \approx \sqrt{\frac{\rho(r)}{\rho_o}}, \quad (2)$$

v_o 은 배경 속력, ρ_o 은 배경 밀도다. 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 2차원 룬버그 렌즈의 기본 구조를 그리면 **Figure 2**와 같다. **Figure 2 (a)**는 반경이 R 인 렌즈의 i 번째 동심원 위치에 있는 세포와의 관계를 나타낸 것이고, **Figure 2 (b)**는 그 세포의 내부 구조다.

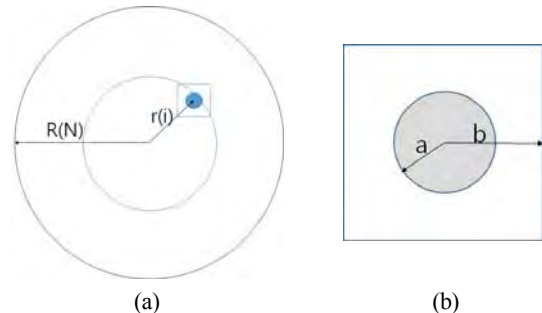


Figure 2: The structure of the lens (a) over all structure composed of many cells. They are radially symmetric. (b) The structure of a cell.

식 (1)의 거리에 따른 굴절률 관계식을 디지털화한다.

$$n_i = \sqrt{2 - \left(\frac{i}{N}\right)^2} \quad (3)$$

N 은 열의 수, 즉 전체 동심원의 숫자고, $i = 1, 2, \dots, N$ 이다. N 이 충분히 크면 i 를 0부터 $N-1$ 까지 해도 결과는 거의 동일하다. 원 내부를 크기가 모두 동일한 정사각형 격자 세포로 구성한 후에, **Figure 2 (b)**처럼 각 격자들 중앙에 임피던스가 공기에 비해 아주 큰 원형 물체를 배치하여, 식 (2)에 따른 공간의 밀도를 조절한다. 그러면 음파는 원형 물체를 피해 전달되며 굴절하여 렌즈의 반대편 가장자리에 모인다.

세포 하나는 한 변의 크기가 $2b = R/N$ 인 정사각형이다. 렌즈 내부는 원형 대칭인데 i 번째 동심원의 반경은 다음처럼 세포의 크기에 i 를 곱한 값이다: $r_i = 2bi$. **Figure 2 (b)**의 구조에 따라 각 세포는 식 (2)의 굴절률 조건을 만족한다. 밀도는 부피의 역수이므로 i 번째에 위치하는 세포의 굴절률은 다음과 같다.

$$n_i = \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{4b^2}{4b^2 - \pi a_i^2}} \quad (4)$$

b 는 세포의 크기에 따라 미리 결정하고, a_i 를 식 (1)을 만족하도록 중심으로부터의 거리에 따라 다르게 변화시킨다. 원통형 2차원 모형이므로 원형 파이프의 높이는 모두 동일하다.

열의 수인 N 을 늘려 파이프를 많이 배치할수록 임피던스가 일치하여 반사파가 적어 초점 능력이 좋아지지만, 구조가 복잡하고, 제작비가 증가한다. 전산모사로 확인한 결과, 10열이면 음향 신호를 앰프로 증폭하여 이용할 수 있는 초점이 형성되었다. N 은 10으로 하고, 식 (2)와 식 (4)으로부터 a_i/b 를 구하여 설계하면 **Figure 3**과 같다. 같은 색은 직경이 같다.

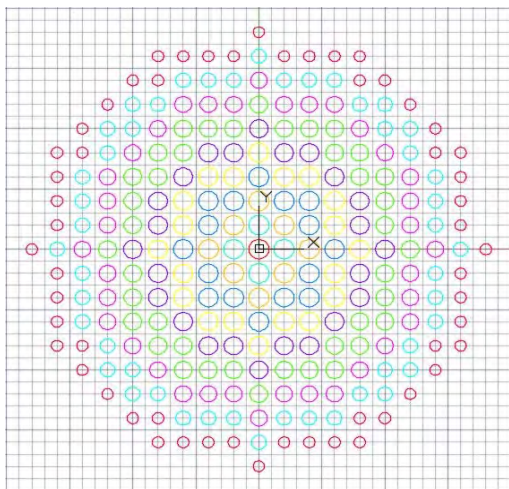


Figure 3: Structure of a 2D acoustic Luneburg lens. It has 10 radial layers that have different diameter and total 253 circles.

Figure 3의 도면을 이용하여 직경 1,800 mm인 2차원 원통형 음향 룬버그 렌즈를 두께 5 mm, 높이 200 mm인 253개의 속이 빈 아크릴 파이프로 제작하였다. 렌즈 중앙에는 직경이 80 mm인 큰 파이프가, 주변으로 갈수록 직경이 작아져 가장자리에는 직경이 45 mm인 파이프를 10층으로 배치하였다. 격자 세포 한 변의 길이, 즉 파이프 기둥 사이 간격은 100 mm로 동일하게 하였다. 위와 아래는 두께 5 mm인 아크릴 판으로 막아 얇은 원기둥형으로 제작하였다. 파이프 재료는 금속, 플라스틱, 아크릴을 비롯하여 공기와 음향 임피던스 차이가 커서 소리가 통과하지 못하는 재질이면 무엇이든 가능하다. 단 선박에 사용하는 경우 사방이 막히지 않은 외부에 설치하는 관계로 녹이 쓸지 않는 것이 좋다. 파이프가 너무 얇으면 음파에 진동하여 파이프 내부에 음파가 발생하므로 식 (1)의 굴절률 조건을 만족하지 못한다. 반면에 파이프가 너무 두꺼우면 렌즈가 무거워져 다루기 어렵다.

이 음향 렌즈가 초점을 형성하기 위한 이론적인 가용 파장은 다음 세 가지 조건을 동시에 만족해야 한다[17][18]. 우선 파장이 렌즈 직경보다 작아야 음파가 충분히 휘어진다.

$$\lambda < 2R. \quad (5)$$

$2R = 1,800$ mm 이므로 음속을 340 m/s 로 두고 이를 계산하면 $f > 189$ Hz가 된다. 반면에 파장이 렌즈를 구성하는 파이프들의 간격보다 작으면 파이프들 사이를 그대로 통과하기 때문에 파이프들 간격보다 커야 한다.

$$\lambda > 2b. \quad (6)$$

$2b = 100$ mm이므로 마찬가지로 이를 계산하면 $f < 3,400$ Hz가 된다. 또한 2차원 원통형 모형은 상하 방향으로는 파가 없어야 하므로 파장이 원통 높이 h 보다 커야 한다.

$$\lambda > h. \quad (7)$$

$h = 200$ mm이므로 마찬가지로 이를 계산하면 $f < 1,700$ Hz가 된다. 따라서 이 세 가지 조건을 모두 만족하는 주파수 영역은 다음과 같다.

$$189 \text{ Hz} < f < 1,700 \text{ Hz}. \quad (8)$$

하지만 이는 이론치고 실제 실험을 해보면 주변과 확연히 구분될 정도의 초점이 만들어지는 주파수 구간은 이보다 좁다. 렌즈가 두꺼울수록, 즉 높이 h 가 클수록 렌즈 내부로 많은 음향신호가 들어오므로 멀리서 오는 기적소리도 인식할 수 있으나, 고주파쪽 가용 주파수 구간이 좁아지며 렌즈가 무겁고 많은 공간을 차지한다.

3. 음향 룬버그 렌즈의 초점 측정

제작된 음향 룬버그 렌즈에 관하여 우선 전산모사를 실시하고, 그 다음에 스피커를 이용한 실내 실험, 그리고 마지막으로 실제 선박의 기적소리를 이용한 실외 실험의 3단계 과정을 거쳤다.

3.1 전산모사

Figure 2와 Figure 3에 의해 제작된 2차원 음향 룬버그 렌즈를 전산모사를 실시하였다. 렌즈 주변에 다른 부분과 구분이 가능할 정도로 초점이 만들어짐을 Figure 4와 같이 확인하였다. 이 경우는 입력 주파수 800 Hz로 우측에서 입사되었고, 전산모사 결과 주변과 구분되는 신뢰할만한 초점이 형성되는 주파수 구간은 300 Hz에서 1,400 Hz 사이로 이론치보다 다소 좁았다.

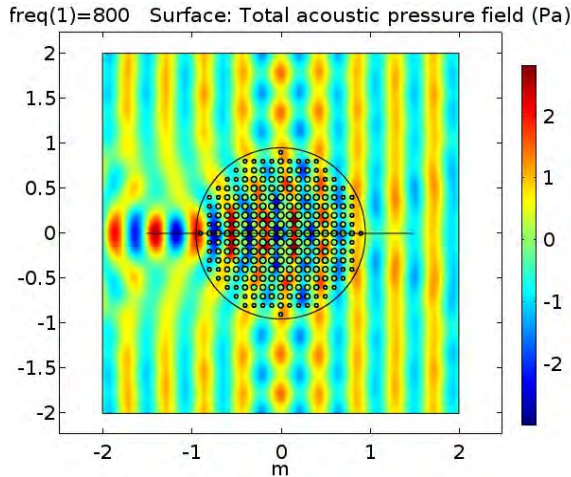


Figure 4: Focusing by acoustic Luneburg lens by the design in Figure 2. The sound wave comes from the right side as a plane wave. Freq. = 800 Hz.

3.2 실내 실험

제작한 음향 룬버그 렌즈의 초점 형성 실험을 실험실 내에서 스피커와 마이크로폰을 이용하여 Figure 5처럼 실시하였다. 평면파를 만들기 위하여 6개의 스피커를 나란하게 장착하여 음원으로 사용하였다.



Figure 5: Experimental setup of the 2D acoustic Luneburg lens. The distance between the sound source and the center of the lens is 2,450 mm.

스피커에서 렌즈 중심까지의 거리는 2,450 mm다. 12 방향에서 음압을 측정된 결과 Figure 6처럼 구분이 가능한 초점이 선명하게 맺히는 것을 확인하였다. 이 원형 그래프는

오실로스코프로 측정된 12 방향의 출력전압을 표시한 것인데 중심에서 밖으로 나갈수록 전압이 높아 음압도 크다. No. 12가 가장 바깥쪽에 표시된 것은 가장 출력 값이 크기 때문이다. 주파수 900 Hz로 No. 6 방향에서 입사되었고, No. 12가 음향이 모이는 출력 방향이다. 렌즈가 좌우 대칭이어서 데이터도 대략 대칭적으로 측정되었다.

2차원 음향 룬버그 렌즈가 주변과 구분이 가능한 초점을 맺으면, 항해사가 근무하는 선교에 렌즈의 작은 모형을 설치하여 렌즈에서 받은 신호를 시각화할 수 있도록 한다. No. 12에 가장 많은 전류가 흐르면 그 반대 방향인 No. 6이 음원 방향이므로 No. 6에 불빛이 켜지고 소리가 나게 한다. 만일 No. 9에 가장 많은 전류가 흐르면 No. 3쪽으로 기적소리가 들어오는 것이므로 이 No. 3에 불빛이 켜지고 소리가 나게 하는 방식이다. 또는 복수의 음원으로부터 오는 신호를 모두 인식하기 위해 12개 마이크로폰 모두에 전류 크기에 비례하는 시각 신호를 렌즈의 반대편에 나타나도록 하여 음원의 방향을 알 수도 있다. 마이크로폰 개수를 줄이거나 늘여 신호의 개수를 필요한 만큼 선택할 수 있다.

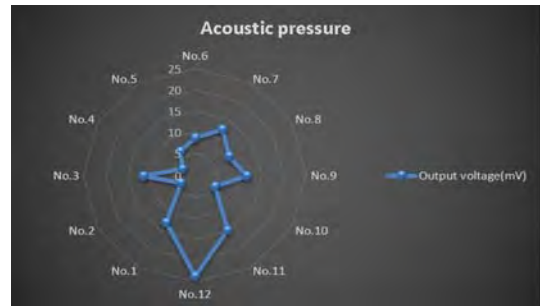


Figure 6: Acoustic pressure and output voltage at twelve positions on the edge. No. 6 is the input direction. Freq. = 900 Hz.

3.3 실습선 기적을 음원으로 한 실험과 고찰

마지막으로 음원으로서 정박된 실습선 새누리호와, Figure 7처럼 소형 트럭에 렌즈를 탑재하고 렌즈 가장자리에 균등간격으로 8개의 마이크로폰을 설치하였다. 실험일자 및 시각은 2017년 6월 10일 토요일 오전 10~12시 사이였다. 기상은 맑았으며 기온은 23도, 풍향과 풍속은 서풍으로서 2 m/s였다.



Figure 7: The 2D acoustic Luneburg lens loaded into a small truck. The data outside was taken in this status.

Figure 8의 지도처럼 실습선으로부터 약 1.4 km 떨어진 지점에 음향 룬버그 렌즈를 위치시키고, 기적을 울려 렌즈 가장자리에 다른 부분과 구분이 가능할 정도로 초점이 맺히는지를 마이크로폰과 오실로스코프로 관측하였다.



Figure 8: The location of the training ship and the acoustic Luneburg lens. The distance between the two points is 1.4 km.

트럭 화물칸에 실은 채 8개의 방향에 대하여 음압을 마이크로폰으로 동시에 측정하였다. No. 1이 입사파 방향이고 No. 5가 그 반대편인 출력 방향이다. Figure 6의 실내 실험 데이터만큼 뚜렷하지는 않았으나, Figure 9처럼 입사파의 반대 위치에 주변과 구분이 가능한 초점을 형성하였다. No. 8이 음압이 가장 높게 나온 것은, 렌즈가 무거워 안전 때문에 렌즈를 Figure 7처럼 트럭 맨 위 대신에 화물칸에 설치하였는데, 화물칸 뒷면 차단벽에 의한 반사파가 발생하였기 때문이다. 렌즈를 사방이 열린 공간에 설치하면 이런 오류는 사라질 것이다.

음원의 세기가 주변 배경음으로부터 구분 가능하면 음원의 세기에는 큰 관련이 없이 초점이 형성되었다. 반면에 음원의 세기가 주변 배경소음과 비슷하면 구분 가능한 초점이 형성되지 않았다. 이상으로 실내와 마찬가지로 실외에서도 음향 렌즈에 의해 음원 반대편에 주변과 구분이 가능한 초점이 형성됨을 확인하였다.

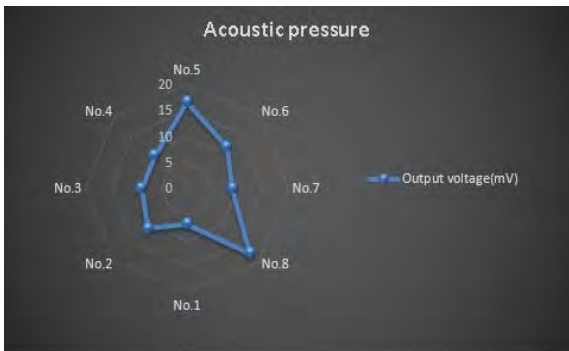


Figure 9: Acoustic pressure and output voltage at eight positions on the edge. No. 1 is the input direction.

측정시에 주변 소음에 의한 노이즈가 있는 경우가 많을 것인데 노이즈는 주로 고주파고 선박의 기적소리는 저주파이므로, 실용화단계에서는 고주파는 버리고 저주파만 골라내는 필터가 필요할 것으로 보인다. 시각화는 디지털과 아날로그 모두 가능하다. 시각화와 동시에 초점이 형성되면 스피커를 장착하여 청각 인식을 통해 항해사에게 경고하는 장치를 첨부한다. 음원이 가까워지면 소리가 커지고, 멀어져 가면 소리가 작아지게 된다.

4. 요약 및 토론

음향 메타 렌즈의 일종인 음향 룬버그 렌즈를 이용하여 선박의 기적소리 방향 측정 장치로 사용이 가능함을 보였다. 이 음향 렌즈를 이용한 음향탐지장치는 국내외를 막론하고 아직 전혀 개발되어 있지 않은 새로운 형태의 음향 수신 장치다. 기존 음향 수신 기기에서 사용하는 복잡한 알고리즘 없이 바로 음원의 움직임을 시각적으로 확인할 수 있으며, 복수 개를 이용하면 음원의 방향뿐만 아니라 거리도 측정이 가능하고, 음원이 멀어지고 있는지 가까워지고 있는지도 실시간으로 알 수 있어서, 음향 레이더로도 사용이 가능하다.

반면에 몇 가지 문제점도 존재하는데 가장 심각한 것은 국제해사기구의 요구 조건인 70 Hz ~ 820 Hz의 사용 영역을 맞추려면 렌즈의 직경이 5 m 정도로 매우 커야 한다는 것이다. 이를 선박 위의 사방이 열린 곳에 설치해야 하므로 상당한 공간이 필요하다. 이는 중 소형 선박에서는 국제해사기구의 조건을 만족시키기 어려워 실용화 단계의 중대한 제한 요소가 될 것으로 보인다.

국내외를 막론하고 선박 간 충돌로 인한 인명과 물적 손실은 줄어들지 않고 있다. 특히 좁은 지역에서는 사고 가능성이 더 높다. 짙은 안개가 낀 날에 출항을 못하는 피해 또한 적지 않다. 이 음향탐지장치는 악천후 시 선박 간 충돌로 발생하는 많은 인적 물적 피해를 줄일 것으로 본다.

References

[1] SOLAS Chapter V. Safety of Navigation, REGULATION 19, Carriage requirements for ship borne navigational systems and equipment, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/343175/solas_v_on_safety_of_navigation.pdf, Accessed October 10, 2017.

[2] IMO resolution MSC.86(70), “Adoption of new and amended performance standards for navigational equipment,” Dec. 1998. <https://www.ecdisregs.com/documents/imo-maritime-safety-committee-resolution-8670/>, Accessed October 10, 2017.

[3] ISO 14859:2012 - Ships and Marine Technology - Sound Reception Systems, <http://www.iso.org/iso/14859.html>

- o.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=55195, Accessed October 10, 2017.
- [4] J. W. Choi and K. J. Kim, "A new sound reception system using a symmetrical microphone array and its numerical simulation," *Journal of Ship & Ocean Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 18-25, 2004 (in Korean).
- [5] C. S. Roh, S. C. Do, and J. S. Lee, "Study on location estimation of nearby ships from whistle blast (1)," *Journal of Korea institute of information, electronics, and communication technology*, vol. 4, no. 1, pp. 32-38, 2011 (in Korean).
- [6] H. J. Kim and J. C. Kim, "A study on digital sound reception systems for ships," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 9, pp. 1125-1130, 2014 (in Korean).
- [7] H. J. Kwon and J. C. Kim, "Design and analysis of direction indicating algorithm for sound reception system based on spectral analysis of whistle signal," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 83-90, 2017 (in Korean).
- [8] IMO resolution MSC.86(70), Adoption of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment, [http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=15454&filename=86\(70\).pdf](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=15454&filename=86(70).pdf), Accessed October 10, 2017.
- [9] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*, Rhode Island: Brown Univ., 1944.
- [10] A. S. Gutman, "Modified Luneburg lens," *Journal of Applied Physics*, vol. 25, no. 7, pp. 855-859, 1954.
- [11] S. P. Morgan, "General solution of the Luneburg lens problem," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 9, pp. 1358-1368, 1958.
- [12] A. D. Falco, S. C. Kehr, and U. Leonhardt, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156-5162, 2011.
- [13] COMSOL Multiphysics 5.1, <https://www.comsol.com/>. Accessed October 10, 2017.
- [14] K. D. Cho, K. W. Kim, M. S. Kwon, and S. I. Hong, "Outer shape design of rotating medium antenna installed on ship mast," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 36, no. 8, pp. 843-850, 2012 (in Korean).
- [15] C. A. Boyles, "Radiation characteristics of spherically symmetric, perfect focusing acoustic lenses," *The Journal of Acoustic Society of America*, vol. 45, no. 2, pp. 351-355, 1969.
- [16] C. A. Boyles, "Wave theory of an acoustic luneburg lens. II. The theory of variable density lenses," *The Journal of Acoustic Society America*, vol. 45, no. 2, pp. 356-364, 1969.
- [17] J. C. Choi, S. H. Kim, and S. R. Lee, "Development of next generation sonar by acoustic lens," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 39C, no. 12, pp. 1318-1322, 2014 (in Korean).
- [18] S. H. Kim, "Cylindrical acoustic Luneburg lens," *8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)*, pp. 364-366, 2014.