

## 음향렌즈를 이용한 차세대 소나개발

최 조 천\*, 김 상 훈\*, 이 성 로°

## Development of Next Generation Sonar by Acoustic Lens

Jo-cheon Choi\*, Sang-Hoon Kim\*, Seong Ro Lee°

## 요 약

기존의 음파의 위상차를 이용하여 음원의 위치와 움직임을 파악하던 소나와 원리가 전혀 다른 음향렌즈형 소나를 개발한다. 이 음향렌즈형 소나는 파동을 수차 없이 렌즈의 반대편 가장자리의 한 점에 완벽히 모으므로 음원의 움직임을 직접 눈으로 볼 수 있다. 소리를 빛으로 바꾸어 움직임을 바로 인식하므로 빛이 전혀 들어오지 않는 깊은 해저의 음향창으로 사용될 수 있다. 실질적으로 사용이 가능한 크기의 소나 모형을 소개하고 현재까지의 개발 상황을 보고한다.

**Key Words** : Sonar, Acoustic Lens, Underwater Communication, Acoustic Window

## ABSTRACT

We develop new sonar system by way of acoustic focusing which is totally different from conventional one in principle. It focuses input wave on the opposite edge of the lens without aberration perfectly. Then, the motion of acoustic source is read by naked eyes. It can be used as an acoustic window deep underwater by converting sound into light. We introduce the sonar in actual size that can be used underwater and report current situation of the development.

## I. 서 론

물은 전기 쌍극자(electric dipole)로서 수중에서는 전자기파가 물 분자와 강력하게 반응하여 멀리 전달되지 못하므로 수중통신에 이용하기 어렵다. 대신 소리는 물속에서 초속 약 1,500m로 아주 빠르고 잘 전달되어 현재까지 거의 유일한 통신 도구다. 자기장은 물속에서도 통과하는데 이를 이용한 통신수단은 아직 개발되어 있지 않다. 소리를 이용하여 물속을 탐색하는 장치인 소나는 20세기 초에 개발되어 약 백 년 동안 많은 발전을 이루어왔으나 그 기본원리는 동일하

다. 넓은 판에 다수의 수중 마이크를 배열하여, 마이크별로 감지하는 음파의 위상차를 비교하고, 그로부터 음원의 방향을 알아내는 것이다<sup>[1]</sup>. 복수의 곳으로부터 음원의 방향을 알아내면 그 사이 각으로부터 음원까지의 거리를 알 수 있다. 그리고 이를 여러 방향으로 스캔하면 음원의 모습을 추정할 수 있다. 이 원리는 물고기의 옆줄과 유사한데 물고기의 비늘 하나하나가 물속의 압력을 감지하는 수중마이크에 해당하기 때문이다. 선박에 설치된 수심 측정기는 가장 간단한 소나이며, 어선에서 사용하는 어군 탐지기도 소나의 일종이다<sup>[2]</sup>. 하지만 일반적으로 소나라 할 때는 수상함과

\* 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2009-0093828)과 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-14-1009).

• First Author : Dept. of Marine Computer Engineering, Mokpo Maritime University, choijo@mmu.ac.kr 정희원

° Corresponding Author : Dept. of Information & Electronics Engineering, Mokpo National University, srlee@mokpo.ac.kr, 정희원

\* Division of Marine Engineering System, Mokpo Maritime University, shkim@mmu.ac.kr

논문번호 : KICS2014-10-409, Received October 8, 2014; Revised December 8, 2014; Accepted December 8, 2014

잠수함에서 사용하는 소나를 뜻한다. 그런데 이런 소나는 고가의 수중 마이크를 수십 또는 수백 개 사용하므로, 가격이 굉장히 비쌀 뿐 아니라, 크기가 대형이며, 음원의 방향을 직접 눈으로 볼 수 있는 것이 아니라 전자 장비를 이용하여 사람이 음원의 방향을 인지할 수 있도록 변화시켜야하므로 구조가 복잡하다.

20세기가 사람들이 육상에서 주로 생활하는 시대라면 21세기는 수중에서도 생활하게 되어 흔히 해양시대라 한다. 해양시대를 맞이하여 빛이 전혀 없는 깊은 물속에서도 간단한 구조로써 비용도 저렴하게 밖을 멀리까지 내다볼 수 있는 대중화된 소나가 요구되고 있다. 소나의 기본은 음원의 방향을 알아내는 것이다. 이 연구에서는 기존 소나와 작동원리가 전혀 다른 음향렌즈를 이용한 전혀 새로운 형태의 소나를 제안하고, 현재까지의 연구결과를 소개 한다.

## II. 본 론

굴절률이 일정한 렌즈는 아무리 잘 만들어도 초점이 한 점에 모이지 않는다. 이를 수차(aberration)라고 하는데 고정된 굴절률을 가진 렌즈에서는 모두 발생한다. 수차 없이 빛이 한 점에 정확히 모이려면 렌즈의 위치에 따라 굴절률을 다르게 만들어야 하는데 이런 렌즈를 그라데이션 렌즈(Gradient INdex Lens)라 한다. 반지름이  $a$ 인 원형렌즈에 입사한 빛이 반대편 가장자리의 한 점에 수차 없이 완벽히 모이는 경우는 굴절률이 다음처럼 반지름의 함수로 주어지는 경우임이 1940~1960년대에 룬버그 등에 의해서 알려졌는데 이를 룬버그 렌즈라 한다<sup>3,5)</sup>.

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

굴절률이 식(1)과 같이 중앙에서는 1.414, 가장자리에서는 공기와 같은 1이면, 굴절률이 큰 렌즈의 중앙에 들어오는 빛은 속력이 느려지고, 굴절률이 작은 렌즈의 가장자리에 들어오는 빛은 속력이 빨라져, Fig. 1 처럼 렌즈의 가장자리에 수차 없이 완벽하게 초점이 맺어진다<sup>6)</sup>. 따라서 초점의 위치를 알면 이용하면 파동의 입사방향을 알 수 있다. 또한 파동의 가역현상으로부터 가장자리에서 나간 구면파는 렌즈를 통과하면 평면파로 바뀌어 나가게 되므로, 이를 음향학적으로 구현하면 수동형 및 능동형 겸용 소나로 사용할 수 있다. 음향 룬버그 렌즈 연구는 1960년대 보일 등에 의하여 오랫동안 연구되어 왔고<sup>7,8)</sup>, 1996년에 미국특허

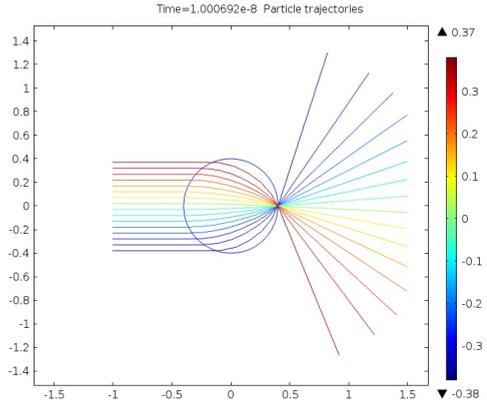


Fig. 1. Numerical simulation of Luneburg lens. The light passage is reversible.

에서도 룬버그 렌즈를 음향학적으로 구현하면 소나로 사용할 수 있다는 것이 제안되었으나 아직까지 실현되지는 못하였다<sup>7,8)</sup>.

음속은 식(2)처럼 공기의 밀도( $\rho$ )와 탄성률( $B$ )의 함수다. 그런데 탄성률은 거의 상수이므로 공기의 밀도를 조절하면 굴절률이 변화하고, 따라서 속력이 변화한다.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (3)$$

$c$ 는 배경속력이다. 따라서 렌즈의 중앙은 소리가 지나가는 길이 짧게 하여 공기의 밀도가 크게 하고, 렌즈 가장자리로 갈수록 넓게 만들어 공기의 밀도가 작아지도록 하면, 입사한 파동이 중앙에서는 상대적으로 느려지고 가장자리에서는 빨라져 휘어진다. 이를 모형을 세워 수치적으로 계산한다.

식 (1)의 반지름에 따른 굴절률을 계산하기 위하여 Fig. 2의 정사각형 격자구조를 만들고 그 위에 공기에 비하여 임피던스가 매우 커 소리가 통과하지 못하는 원형 장애물을 정사각형으로 배치하면 원통 사이의 통로면적에 의하여 밀도가 구해진다. 장애물의 배치는 4각 구조가 아니라 6각 구조 등 밀도를 변화시킬 수 있으면 무엇이든 상관없다. 배치의 대칭성에 의하여 Fig. 2에서 원 면적의 1/4을 포함하는 사각형 구간만 고려하여 계산한다. 중심에서 반경이 같으면 밀도가 같아지는데 렌즈를 모두

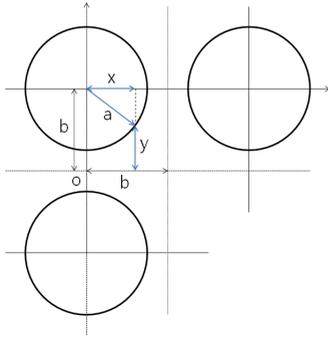


Fig. 2. Calculation of refractive index by variable density method. The acoustic wave passes between the circular columns.

N개의 동심원으로 분할한다면 i번째 동심원의 밀도  $\rho_i$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\rho_i}{\rho_o} = \frac{b}{y_{rms}} \tag{4}$$

$y_{rms}$ 는 i번째 동심원 구간의 실효치(root-mean square)로서 다음처럼 위치에 따라 다르다.

$$y(x) = \begin{cases} b - \sqrt{a^2 - x^2} & : 0 \leq x \leq a \\ b & : a \leq x \leq b \end{cases} \tag{5}$$

2차원 원통형 소나가 아니고 3차원 구형 소나인 경우에는 식 (4)부터 달라진다.

다음은 각 동심원 구간별 원기둥 반경과 동심원 간격의 비율인  $a_i/b$ 를 구한다. 식 (5)로부터 식 (4)의  $y_{rms}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{rms}^2 &= \frac{1}{b} \left[ \int_0^a (b - \sqrt{a^2 - x^2})^2 dx + \int_a^b b^2 dx \right] \\ &= b^2 - \frac{\pi a^2}{2} + \frac{2}{3} \frac{a^3}{b} \end{aligned} \tag{6}$$

2차원 모형의 4각배치인 경우  $y_{rms}$ 는 항상 식 (7)처럼 주어진다. i번째 동심원 부분의 굴절률  $n_i$ 를 식(1)로부터 디지털화하여 쓸 수 있다.

$$n_i = \sqrt{2 - \left(\frac{i - 0.5}{N}\right)^2} \tag{7}$$

$i=1, 2, 3, \dots, N$ . 식 (7)을 식 (4)에 대입한 후 식 (6)과 일치시키면 위치에 따른 반경의 관계식을 얻는다.

$$n_i^2 = 2 - \left(\frac{i - 0.5}{N}\right)^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\pi}{2} w_i^2 + \frac{2}{3} w_i^3}} \tag{8}$$

$w_i = a_i/b$ 다. 식 (8)을 풀어  $i=1$ 에서  $i=N$ 까지의 반경비  $w_i$ 를 구한다.  $b = 1cm$ 로 두면 격자사이의 간격은  $2b = 2cm$ 가 된다.  $N=15$ 로 두면 소나 반경은  $R = 15 \times 2b = 30cm$ 가 된다. N이 클수록 소나 반경이 커지는데  $N=10$ 이상이면 정상적으로 작동하였다. 이 소나의 가용 주파수는 이론적으로 파장이  $2b$  보다는 크고  $2R$ 보다는 작아야 한다. 따라서 이론적 가용주파수 구간은 다음과 같다.

$$\frac{v}{2R} < f < \frac{v}{2d} \tag{9}$$

$v$ 는 음속이다. 따라서 저주파용은 R을 크게 만들고 고주파용은 d를 작게 만든다. 하지만 이는 직경에 비하여 기둥의 길이가 큰 형태의 경우이고 실제로는 가용주파수 범위가 이보다 좁다.

이상의 결과를 캐드를 이용하여 그리면 Fig. 3과 같다.  $r_i$ 가 같으면 직경이 동일한 작은 원이 15개의 동심원으로 배치되어있다. 음파가 작은 원들 사이를 통과하면서 굴절하는데, 중앙부는 직경이 크고 가장자리로 갈수록 직경이 작다.

Fig. 3의 구조를 콤솔(COMSOL) 컴퓨터 시뮬레이션에 입력하였다. 왼쪽에서 주파수  $f=2,500Hz$ 인

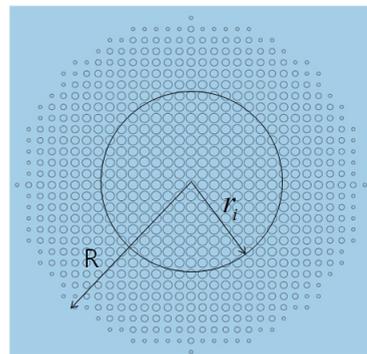


Fig. 3. Acoustic Luneburg lens designed by CAD. It was composed of 701 small circles of different radii.

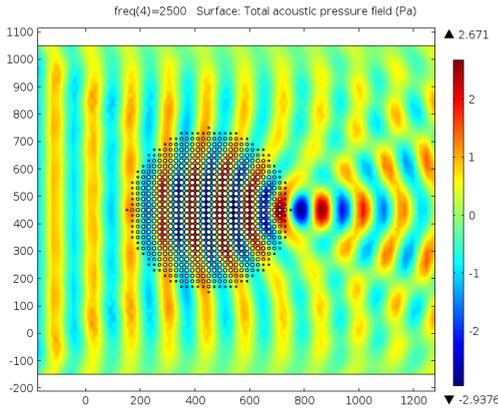


Fig. 4. Numerical simulation of sound focusing by acoustic Luneburg lens. The wave passage is reversible.  $f=2,500\text{Hz}$ .

음파를 보내니 Fig. 4처럼 파동이 휘어져 반대편 가장자리에 수차 없이 완벽히 모였다.

### III. 측정

이를 실제로 만들어보겠다 컴퓨터 시뮬레이션 결과인 Fig. 4처럼 직경이 다른 701개의 알루미늄 막대를 배치하였다. 제작한 음향렌즈는 Fig. 5에서 보는 것처럼 직경은 60cm고 높이는 15cm이나 위아래 판 속에 5mm씩 들어가 있다. 소나의 위와 아래는 파동이 새어나가지 않도록 FRP로 고정하였다. 재료로 알루미늄 막대를 사용하였는데 공기와 임피던스 차이가 큰 물질이면 나무나 아크릴 등 어떤 재료로 만들어도 상관없다. 단 물속에서는 임피던스가 큰 공기 중과 다른 물질로 만들어야 한다.

이 소나를 이용한 실제 실험 데이터는 Fig. 6과 같다. 8개의 마이크를 M1 부터 M8까지 소나 주변

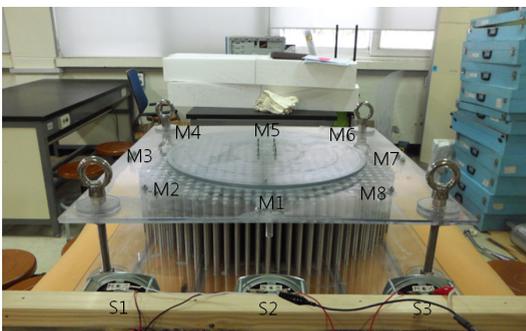


Fig. 5. New sonar system using acoustic lens. Three speakers and eight microphones were used as emitters and receivers.

에 등간격으로 둥글게 배치하였다. M1이 S2로부터 20cm떨어져 있으며, M5는 반대편의 가장 먼 마이크로 이상적인 렌즈라면 파동이 M5에 모이게 된다. 실험의 결과 M5에 파동이 모이는 것을 확인하였다. 압력은 전압에 비례하는데 M5의 음압이 가장 가까운 마이크인 M1을 통과하는 음압에 비해 대략 3~4 배 정도 커진다. 이는  $\Delta\beta = 20\log(V_{out}/V_{in})$ 에 의하여 대략 10데시벨 정도 소리를 증폭시킨다. 따라서 마이크로 음원의 움직임 충분히 구분할 수 있다. 소리 빔 전환기를 마이크 대신에 설치하면 소리의 움직임을 눈으로 볼 수 있다.

측정결과 작동 가용주파수의 범위는 식 (9)의 이론적 주파수 구간보다 약간 좁았다. 측정에서는 Fig. 6처럼 대략 1,000~3,200Hz 사이에서 소리가 모아졌다. 소나가 얇을수록 가용주파수 범위는 좁으나 피크는 선명하다.

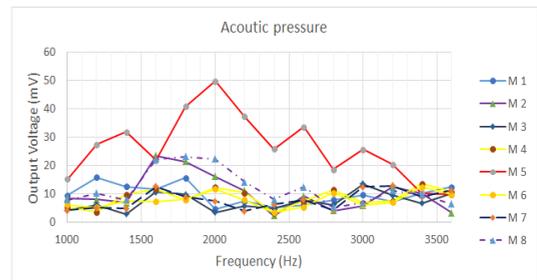


Fig. 6. Acoustic pressure at the 8 positions. M1 is the nearest point from the emitters and M5 is the point of sound focusing.

### IV. 결론

광학의 룬버그 렌즈의 원리를 음향학적으로 구현하면 음향렌즈를 만들 수 있는데, 음원이 정확히 렌즈의 반대 방향에 모이므로 음원의 방향을 알 수 있다. 따라서 음원의 방향의 쉽게 눈으로 확인할 수 있어서 차세대 소나를 만드는데 사용할 수 있다. 이 실험에서는 직경이 각기 다른 7백여개의 알루미늄 막대를 정사각형 격자구조로 배치하여 매질의 굴절률을 변화시킴으로써 음향렌즈를 제작하였다. 가용주파수 범위는 대략 1,000~3,200Hz였다. 가용주파수 범위는 구조에 따른다. 기존 소나가 물고기의 옆줄을 구현한 것이라면 음향렌즈를 이용한 소나는 돌고래의 청각창치를 구현한 것과 유사하다. 이 차세대 소나는 구조가 간단하며 기존 소나와 혼합하여서도 사용이 가능하다. 초음파를 이용하면 아주 작게 만들 수도 있으므로 잠수부가 사

용할 수 있는 개인용 소나 시대를 열 수 있을 것으로 본다.

### References

- [1] R. J. Urick, *Principles of underwater sound*, 3rd Ed., Peninsular Publishing, 1983.
- [2] J. Choi, G. Kim, J. Kim, and S. Lee, "Valuation on economical value of operation frequencies for the fishery communications," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, 2014.
- [3] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*, Rhode Island: Brown Univ., 1944.
- [4] A. S. Gutman, "Modified Luneburg Lens," *J. Applied Phys.*, vol. 25, no. 7, pp. 855-859, Jul. 1954.
- [5] S. P. Morgan, "General solution of the Luneburg Lens Problem," *J. Applied Phys.*, vol. 29, no. 9, pp. 1358-1368, Sep. 1958.
- [6] A. D. Falco, S. C. Kehr, and U. Leonhardt, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156-5162. Mar. 2011.
- [7] C. A. Boyles, "Radiation characteristics of spherically symmetric, perfect focusing acoustic lenses," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 45, no. 2, pp. 351-355, Feb. 1969.
- [8] C. A. Boyles, "Wave theory of an acoustic luneburg lens. II. The theory of variable density lenses," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 45, no. 2, pp. 356-364, Feb. 1969.
- [9] T. Deegan, *Electrically Steered Acoustic Lens*, U. S. Patent, no. US005546360A, Aug. 13, 1996.

### 최 조 천 (Jo-cheon Choi)



1986년 : 서울과학기술대학교  
전자공학과 학사  
1990년 : 조선대학교 컴퓨터공  
학과 석사  
1998년 : 한국해양대학교 전자  
통신공학과 박사  
현재 : 목포해양대학교 해양컴퓨  
터공학과 교수

<관심분야> 해양전자통신, 계측제어

### 김 상 훈 (Sang-Hoon Kim)



1984년 : 서울대학교 물리학과  
학사  
1986년 : 서울대학교 물리학과  
석사  
1993년 : Univ. of Missouri-  
Columbia, U.S.A., 박사  
현재 : 목포해양대학교 기관공학  
부 교수

<관심분야> 파동학, 메타물질, 수중통신

### 이 성 로 (Seong Ro Lee)



1987년 2월 : 고려대학교 전자공  
학과 공학사  
1990년 2월 : 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학석사  
1996년 8월 : 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학박사  
1997년 9월~현재 : 목포대학교 공  
과대학 정보전자공학과 교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시스  
템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템