

2차원 음향 룬버그 렌즈 설계 및 해석

김 상 훈*, 김 정 우*, 황 건

Design and Analysis of 2D Acoustic Luneburg Lens

Sang-Hoon Kim*, Jung-Woo Kim*, Gunn Hwang

요 약

직경(D) 90mm, 열의 수(N)가 15개인 초음파용 2차원 음향 룬버그 렌즈를 설계 하였다. 렌즈 한 변의 길이를 3mm인 정사각형 격자로 나누고, 각 격자 중앙에 크기가 서로 다른 701개의 정사각형 기둥을 스테인리스강(SUS304) 재질로 구성하였다. FEM 해석 프로그램(COMSOL)을 이용하여 음향 룬버그 렌즈의 공기와 수중에서의 초점을 확인하고 음압 이득(SPL gain)을 얻었다. 공기에서는 20~35kHz, 수중에서는 100~180kHz에서 안정된 초점을 형성하였으며, 최대 음압 이득은 공기에서는 15dB@32kHz, 수중에서는 12dB@175kHz 이었다.

Key Words : acoustic lens, metamaterial, ultrasonography, SPL gain

ABSTRACT

We designed that a two-dimensional acoustic Luneburg lens for ultrasound with a diameter of 90mm and 15 layers. The acoustic Luneburg lens is composed of 701 columns with square cross section made of SUS304 whose sizes were different from each columns placed at the center of the square grid with one side of 3mm in length. Using computer simulation program(COMSOL), we confirmed that the plane wave was focused after being passed by the acoustic Luneburg lens and got the SPL gain in air and water condition. The focal point was stable at 20~35kHz in air and 100~180kHz in water. The maximum SPL gain of the acoustic Luneburg lens were 15dB@32kHz in air and 12dB@175kHz in water.

I. 서 론

굴절률이 일정한 렌즈는 아무리 잘 만들어도 초점이 한 점에 모이지 않는데, 이를 수차(aberration)라고 한다. 수차 없이 빛을 한 점에 정확히 모이게 하려면 렌즈의 위치에 따라 굴절률을 다르게 만들어야 한다. 이러한 렌즈를 굴절률 변환형 렌즈 또는 그린 렌즈(GRIN Lens, GRadient INdex Lens)라 한다. 1940년대 이후에 룬버그(Luneburg)를 비롯한 여러 학자들에

의하여 렌즈에서 입사한 빛이 반대편에 수차 없이 완전하게 초점을 맺기 위한 조건들이 연구되어왔다^{1)~3)}. 파동의 속력은 굴절률이 클수록 작아지며, 렌즈 중앙에서는 굴절률이 크고 가장자리로 갈수록 작게 하면, 렌즈 중앙을 통과하는 파는 천천히 가고 가장자리를 통과하는 파는 빨리 가서, 파동이 휘어져 한 점에 수차 없이 완벽하게 초점을 형성할 수 있다는 것이다. 이를 룬버그 렌즈라고 하는데, 파의 초점이 원형 렌즈 입사방향의 반대편 가장자리에 정확히 형성되기 때문

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [2017-0-00052, 휴먼 감각 감지 및 진단을 위한 초감각 스마트 물리센서 원천 기술]

♦ First Author : Mokpo National Maritime University, Division of Marine Engineering, shkim@mmu.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, hwangun@etri.re.kr, 정희원

* Mokpo National Maritime University, Division of Marine Engineering, tkfka5799@daum.net

논문번호 : 201806-0-071-SE, Received May 31, 2018; Revised November 6, 2018; Accepted November 12, 2018

에 렌즈는 파동의 집중성과 방향성의 검출이 가능해진다. 파동의 집중성을 이용하면 파원의 신호를 전원 없이 증폭할 수 있고, 방향성을 이용하면 파원의 위치 및 움직임을 알 수 있다.

룬버그 렌즈의 연구가 시작되자 자연스럽게 이를 음향학적으로 구현한 음향 룬버그 렌즈(ALL, Acoustic Luneburg Lens)에 관한 연구도 Boyles 등에 의하여 1960대부터 시작되었다^{4,5}. 또한, 최근에 메타물질 연구에 힘입어 메타렌즈의 일종으로서 메타물질 연구의 중요한 주제가 되고 있다. 전자기 룬버그 렌즈는 오래전부터 구현되어 안테나 등에 사용되어 왔지만⁶⁻⁸, 음향 룬버그 렌즈는 최근에야 구현되었다⁹⁻¹¹. 이후 지금까지 룬버그 렌즈에 대한 많은 국제적 연구가 이루어졌고, 특히 전자기 룬버그 렌즈는 소형화 및 응용분야로의 진입을 앞두고 있다¹²⁻¹⁴. 음향 룬버그 렌즈 외에 다른 형태의 음향 렌즈 연구는 국내외에서 그 이전부터 이루어져 왔다¹⁵⁻¹⁷.

음파는 수중이 공기에서보다 4~5배 빠르고 멀리까지 전달되기 때문에, 수중 통신을 비롯한 소나, 어군 탐지기 등에서의 수중 정보 획득 및 인체에서의 초음파 진단기 등에 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 공기와 수중에서 사용이 가능한 2차원 음향 룬버그 렌즈를 설계하고, 전산해석을 통하여 음파의 정보를 획득하는데 응용이 가능한 정도의 집중성을 보이는지 음압 이득(SPL gain, Sound Pressure Level gain)을 구하여 살펴보았다.

II. 룬버그 렌즈 제작의 배경 이론

파동을 렌즈 반대편 가장자리에 수차 없이 하나의 초점에 모으는 룬버그 렌즈의 굴절률은 오로지 렌즈의 반지름에만 의존한다. 반지름이 R인 룬버그 렌즈의 경우에 굴절률(n, Refractive Index)이 중심으로부터의 거리 r의 함수로 다음과 같다¹⁶⁻¹².

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad 0 \leq r \leq R \quad (1)$$

따라서 렌즈의 중앙에서는 굴절률이 $\sqrt{2}$ 이고, 가장자리에는 공기와 같은 1이다. 2차원 룬버그 렌즈의 모형은 원통형이고 3차원 룬버그 렌즈의 모형은 구형인데 굴절률에 관한 공식은 식 (1)로서 동일하다.

전자기파의 굴절률은 $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ($\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, $\mu_r = \mu/\mu_0$)로서 진공에 대한 상대적인 전기유전율

(ϵ_r)과 자기투자율(μ_r)이 결정하는데 비하여, 음향 룬버그 렌즈의 굴절률은 $n = \sqrt{\rho_r \kappa_r}$ ($\rho_r = \rho/\rho_0$, $\kappa_r = \kappa/\kappa_0$)로서 배경에 대한 상대 밀도(ρ_r)와 상대 압축률(κ_r)로 결정된다. 파동이 지나가는 배경과 동일한 재질인 경우 압축률(compressibility)은 거의 일정하므로, 파동이 지나가는 공간의 밀도만으로 굴절률이 결정된다¹³⁻¹⁷.

직경이 D인 2차원 원형 렌즈에 입사한 파동이 반대편에 수차 없이 초점을 형성하기 위한 조건은 식 (1)과 같은데 제작에서는 이를 디지털화한다. 총 N개의 동심원으로 이루어진 렌즈에서 i번째 동심원 부분의 굴절률은 다음과 같다.

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

($i=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$). 이를 $i=1$ 에서 $i=N$ 까지 해도 N이 충분히 크면 거의 유사한 결과를 얻는다. N이 클수록 동심원 사이의 임피던스가 일치하여 집중성이 높아져 음압 이득은 증가하지만, 구조가 복잡하여 설계가 어렵고 제작비용이 증가한다.

음파의 굴절률은 식 (3)처럼 반경이 r인 지점에서 공간의 밀도만으로 결정되는데 2차원의 경우에는 음파가 통과하는 공간의 면적에 따른다.

$$n(r) = \frac{v_0}{v(r)} = \sqrt{\frac{\rho(r)}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{A_0}{A(r)}} \quad (3)$$

음파는 임피던스 차이가 큰 부분을 피해서 통과하는데, v_0 , ρ_0 , A_0 는 임피던스 차이가 큰 물체가 없을 때의 배경 속도, 배경 밀도, 배경 면적이며, $v(r)$, $\rho(r)$, $A(r)$ 은 임피던스 차이가 큰 물체가 있을 때의 반경 r에서의 속도, 밀도, 면적이다.

III. 2차원 음향 룬버그 렌즈의 설계

실험을 진행한 모델은 3차원 프린터로 제작이 가능하고 초음파 영역에서 사용가능한 크기로 하였다. 동심원의 개수(N)는 15개, 렌즈 직경(D)은 90mm인 렌즈를 구성하는 정사각형 단위격자의 한 변의 길이는 $b=(D/2)/N=3\text{mm}$ 로 하고, 전체 형상은 Fig. 1과 같이 모두 701개의 격자 격자로 구성하였다. 장애물 사이의 통로 면적에 의하여 밀도가 구해진다. 장애물의 모양은 삼각형, 사각형, 원형, 십자가 등 모든 다면체 구

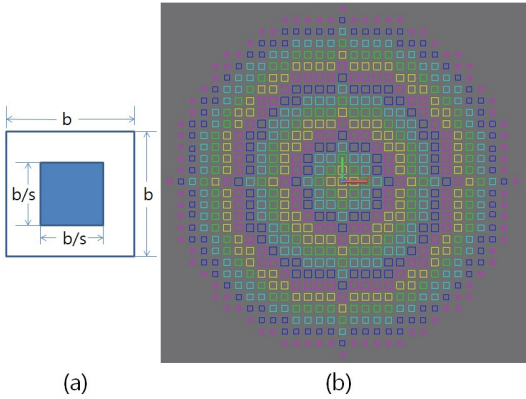


그림 1. (a) 중앙에 정사각형 모양의 높은 임피던스 물질을 가지는 단위격자 (b) 음향 룬버그 렌즈의 구조물은 15열이며, 701개의 정사각형의 블록으로 이루어져 있다. 같은 색깔은 단위격자 내에서 같은 크기의 블록을 나타낸다. 또한, $s > 1$ 인 경우를 나타내는 그림이다.
 Fig. 1. (a) A cell with a square shape high impedance materials in the center. (b) The structure of the acoustic Luneburg lens has 15 layers and 701 square blocks. The same color has the same block size in the cell. Also, this figure shows $s > 1$ case.

조에서 밀도 조건만 맞으면 무엇이든 가능하지만, 본 연구에서는 Fig. 1(a)처럼 렌즈 내부를 크기가 모두 동일한 한 변이 b 인 정사각형 격자를 구성한 후에, 각각의 격자 중앙에 배경 물질(공기 또는 물)에 비하여 임피던스가 매우 큰(소리가 통과하지 못하는) 정사각형 장애물을 배치하면, 장애물 사이의 통로 면적에 의하여 밀도가 구해진다. 수중에서는 물의 음향 임피던스가 커서 음파는 대부분의 물체 표면을 뚫고 들어가므로 재질이 매우 중요하다. 본 연구에서는 물과 임피던스 차이가 큰 스테인리스강인 SUS304를 이용하여 설계하였다.

Fig. 1처럼 격자 하나는 한 변의 크기가 $b = (D/2)/N$ 인 정사각형이다. 격자 중앙에 한 변이 b/s ($s > 1$)인 정사각형 장애물을 배치하여, 식 (4)와 식 (5)에 따라 공간의 밀도를 조절한다. 그러면 렌즈의 중앙은 음파가 지나가는 길을 좁게 하여 공기의 밀도를 커지게 하고, 렌즈 가장자리로 갈수록 길을 넓게 만들어 공기의 밀도를 작아지게 하면, 입사한 음파가 중앙에서는 상대적으로 느려지고 가장자리에서는 빨라져 휘어져, 그 결과 렌즈의 반대편 가장자리에 음파가 모인다.

렌즈 내부는 원형 대칭인데 i 번째 동심원의 반경은 격자의 크기에 i 를 곱한 값($r_i = bi$)이다. 밀도는 부피의 역수이므로 i 번째에 위치하는 격자의 굴절률은 다음 식 (4)와 같다.

$$n_i = \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{A_o}{A_i}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{s_i^2}}} \quad (4)$$

식 (2)와 식 (4)는 같으므로 다음 식으로부터 i 번째 동심원에 위치한 중심부 정사각형 크기 비율인 s_i 를 얻는다.

$$s_i = \sqrt{\frac{2 - \left(\frac{i}{N}\right)^2}{1 - \left(\frac{i}{N}\right)^2}} \quad (5)$$

식 (5)의 결과를 이용하여 음향 룬버그 렌즈를 설계 하면 Fig. 1(b)와 같다. 같은 크기의 격자들끼리 알기 쉽게 구분하기 위하여 동심원에 따라 색으로 구분하였다.

음향 룬버그 렌즈가 음향학적인 초점을 만드는 주파수 구간은 렌즈의 기하학적 구조로부터 결정된다. 초점이 맺어지려면 렌즈 내부에서 파동이 휘어져야 하므로, 이론적으로 파장이 렌즈 격자의 크기인 b 보다 크고, 렌즈 직경인 D 보다는 작아야 한다. 따라서 이론적 가용주파수 구간은 다음과 같다^[10,11].

$$\frac{v}{D} < f < \frac{v}{b} \quad (6)$$

v 는 배경 음속이다. 따라서 저주파수 대역 음향렌즈는 D 을 크게 만들고 고주파수 대역 음향렌즈는 b 를 작게 만든다. 또한 2차원인 경우에는 상하 방향으로 파동이 형성되지 않아야 하므로 원통의 높이가 파장보다 작아야 한다.

$$h < \lambda \quad (7)$$

2차원 전산모사에서는 h 가 아주 작은 값이라고 가정하고 이루어진다. 따라서 2차원 원통형 음향 룬버그 렌즈의 가용주파수는 식 (6)과 식 (7)을 동시에 만족하는 범위에서 결정된다. 설계한 모형이 $D=90\text{mm}$, $b=3\text{mm}$ 이므로 렌즈의 이론적 가용주파수 구간은 $3.5\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$ 이지만, 실제로 제작하여 측정해 보면, 산업화의 용도로 사용가능하다고 예상되는 즉, 10dB 이상의 음압 이득을 보이는 주파수 구간은 이보다 훨씬 좁다^[9-12].

IV. 공기 및 수중에서의 수치해석

설계된 Fig. 1(b)의 모양을 전산모사 프로그램에서 불러 한 쪽에 평면파를 보내 주파수에 따른 집중성과 음압 이득을 얻었다. 수치해석에는 COMSOL Multiphysics 5.1을 사용하였다¹⁸⁾. 공기 중에서 수치해석 결과로 Fig. 2의 음압분포를 얻었다. Fig. 2.에서 렌즈 왼쪽에서 음향파가 입사하여 렌즈 내부에서 휘어져 렌즈 오른쪽에 가장자리에 초점이 맺어지는 것을 볼 수 있다. 원형 렌즈는 그 대칭성 때문에 어느 방향에서 파동이 입사하더라도 결과가 거의 같은 장점이 있다.

렌즈 대칭선상에서 주파수별 최대 음압 이득은 Fig. 3과 같다. 수치해석을 위해 입력파는 렌즈에 입사하기 전 렌즈 부근의 평균 음압으로, 출력파는 가장 강한 초점이 맺어진 곳의 음압으로 설정하였다. 즉, 음압이득을 출력 측에서 측정된 최대 음압과 입력 측에서 측정된 평균 음압의 차로 정의하였고, 로그 스케일에서 출력파의 최대치와 입력파의 평균치의 비율을 dB 단위로 환산한 값은 식 (8)과 같다. 배경물질이 공기인 곳에서는 최대 음압이득은 25~35kHz 부근에서 약 15dB이었다. 이 값은 식 (8)에 따르면 입사파의 음압이 렌즈를 통과한 후에 대략 3~5배 커지는 것에 해당한다.

$$SPL\ gain = 20\log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) [dB] \quad (8)$$

여기서, P는 음압이다.

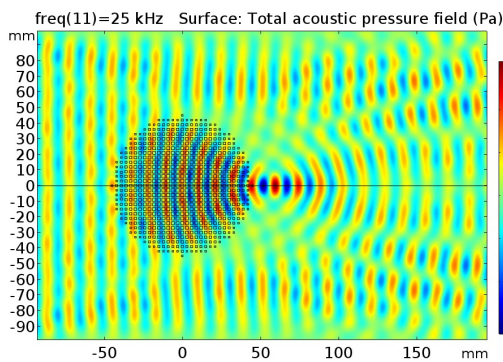


그림 2. 공기에서의 음향 룬버그 렌즈의 수치해석 결과. 렌즈의 재질은 SUS304, 적용 주파수는 25kHz이다.
Fig. 2. Numerical simulation of the acoustic Luneburg lens in the air. The material of the lens is SUS304 and the applied frequency is 25 kHz.

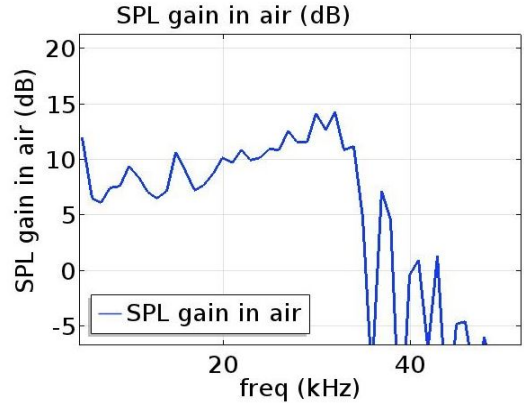


그림 3. 주파수별 음향 룬버그 렌즈의 음압 이득
Fig. 3. The acoustic gain of acoustic Luneburg lens by applied frequency.

공기에서와 같이 수중에서의 음파 집중 연구 또한 많이 이루어져왔다^{11,19)}. 하지만 아직도 많은 어려움이 존재하는데 이는 배경물질인 물의 음향 임피던스가 매우 커서 다루기 어렵기 때문이다. 물의 음향 임피던스는 공기에 비해 약 3,600배(밀도 800배 x 속력 4.5배) 정도로 충분히 커서 소리가 물에서 공기로 뚫고 들어가기 어렵지만, 모형의 사각 기둥 내부를 공기로 채우는 경우는 음파가 렌즈 내부로 진입하지 못하여 초점을 형성하지 못한다. Fig. 2의 배경물질이 수중에서 공기에서처럼 초점이 맺히려면 임피던스 차이가 적어도 100배 이상 되는 물질로 렌즈를 제작해야 한다¹¹⁾. 본 연구에서 설정한 재료인 스테인리스강(SUS304)의 음향 임피던스는 물에 비해 약 30배(밀도 8배 x 속력 4배) 정도여서 식 (3) ~ (5)의 계산이 식 (1)의 굴절률 조건을 정확하게 만족하지 못한다.

배경물질을 물로 바꿔 실시한 수치해석 결과는 Fig. 4와 같다. 주파수는 공기 중 값의 5배인 125kHz를 적용하였다. 수중에서는 음속이 약 1,500m/s으로 공기 중에 비하여 4~5배 빨라지는데, 이는 파장이 길어지는 것이므로, 같은 물체로 실험하는 경우 주파수를 4~5배 높은 구간에서 사용해야 한다. Fig. 4를 Fig. 2와 비교해보면 공기 중에 비해 초점이 덜 맺어지며, 초점이 렌즈에 붙지 않고 떨어지는데, 음파가 기둥의 표면을 뚫어 굴절률 조건 식 (1)을 완전하게 만족하지 못하기 때문이다. 이를 보완하기 위하여 수중용 렌즈는 물에 비하여 음향 임피던스가 아주 큰 재료를 사용해야 한다.

Fig. 4의 렌즈 대칭선상에서 수중에서의 음압 이득을 얻으면 Fig. 5와 같다. 입력파는 렌즈에 입사하기 전 렌즈 부근의 평균 음압이고, 출력파는 가장 강한

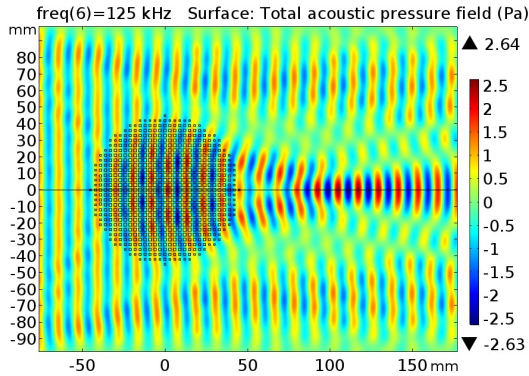


그림 4. 수중에서의 음향 Luneburg 렌즈의 수치 시뮬레이션이다. 렌즈의 재질은 SUS이며 적용 주파수는 125kHz이다.
Fig. 4. Numerical simulation of the acoustic Luneburg lens in the water. The material of the lens is SUS and the applied frequency is 125kHz.

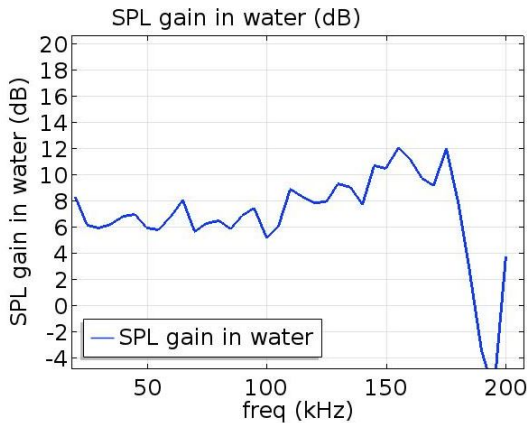


그림 5. 적용 주파수에 따른 수중 배경에서의 음향 룬버그 렌즈의 음압 이득.
Fig. 5. The acoustic gain by the acoustic Luneburg lens underwater background depending on the applied frequency.

초점이 맺어진 곳의 음압이다. 식 (8)에서와 마찬가지로 수중에서의 음압 이득은 최대출력에서 입사된 평균 음압과의 차이로 정의할 수 있다. 최대 수중 음압은 공기 중에서 구한 주파수 값의 약 5~6배 정도 큰 160~175kHz 부근에서 약 12dB 이었다.

직경 60 cm인 대형 렌즈를 이용한 이전 실험 결과에서는 10dB 이상의 음향이득을 보였다⁹⁻¹¹. 또한 어느 방향에서 파동이 입사하건 동일한 효과를 맺는 것을 관측을 통하여 확인하였다. 따라서 이 논문에서 설계한 더 정밀한 소형 음향렌즈의 경우 가용주파수대가 초음파 영역으로 이동할 뿐 유사한 실험결과를 보일 것으로 예측한다^{20,21}.

V. 결론 및 토의

원형 렌즈 반대편 가장자리에 수차 없이 초점을 맺을 수 있는 광학의 룬버그 렌즈를 음향학적으로 구현하였다. 2차원인 경우 얇은 원통형 구조를 반지름에 따라 굴절률을 다르게 제작하여야 한다. 역학적 파동의 경우 굴절률은 밀도와 압축률로서 결정되므로 둘 중에 하나를 변화시켜야 하는데, 압축률이 거의 상수이므로 밀도를 변화시켜서 다공체 구조로 설계하였다.

렌즈 직경(D)은 90mm, 동심원의 개수(L)는 15 열, 한 변이 3mm인 정사각형 격자 구조로 구성하였다. 격자 중앙에 임피던스가 공기나 물보다 아주 큰 SUS304로 이루어진 701개의 정사각형 기둥 모양을 배치하여 음파가 통과하는 공간의 굴절률을 조절하고, 이 굴절률에 따라 음파가 휘어지게 하였다. 이를 공기와 수중에서 FEM해석 프로그램(COMSOL)을 사용하여 수치해석 결과, 최대 음압이득은 배경물질이 공기인 곳에서는 15dB@32kHz, 수중에서는 12dB@175kHz 이었다.

References

- [1] R. K. Luneburg, *Mathematical theory of optics, Advanced instruction and research in mechanics*(Brown Univ.), pp. 182-213, 1944.
- [2] A. S. Gutman, "Modified luneburg lens," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 7, pp. 855-859, Jul. 1954.
- [3] S. P. Morgan, "General solution of the luneburg lens problem," *J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 9, pp. 1358-1368, Sep. 1958.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. Sanford, "A luneburg-lens update," *IEEE Xplore*, vol. 37, no. 1, pp. 76-79, Feb. 1995.
- [7] A. V. Bori Skin and A. I. Nosich, "Whispering-gallery and luneburg-lens effects in a beam-fed circularly layered dielectric cylinder," *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol.

- 50, no. 9, pp. 1245-1249, Dec. 2002.
- [8] C. Pfeiffer and A. Grib, "A printed, broadband lüneburg lens antenna," *IEEE Xplore*, vol. 58, no. 9, pp. 3055-3059, Sept. 2010.
- [9] S.-H. Kim, "Cylindrical acoustic lüneburg lens," in *Proc. The 8th Int. Cong. on Advanced Electromagnetic materials in Microwaves and Optics*, pp. 364-366, Bordeaux, France, Aug. 2014.
- [10] J.-C. Choi, S.-H. Kim, and S.-R. Lee, "Development of next generation sonar by acoustic," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. Sci.*, vol. 39C, no. 12, pp. 1318-1322, Dec. 2014.
- [11] S.-H. Kim, "Realization of an acoustic lüneburg lens and the dependencies of its focusing characteristics on the background and materials," *New Physics: Sae Mulli*, vol. 65, no. 9, pp. 927-932, Jul. 2015.
- [12] A. D. Falco, S. C. Kehr, and U. Leonhardt, "Lüneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156-5162, Mar. 2011.
- [13] T. Zentgraf, Y. Liu, M. H. Mikkelsen, J. Valentine, and X. Zhang, "Plasmonic lüneburg and eaton lenses," *Nature Nano.*, vol. 6, pp. 151-155, Jan. 2011.
- [14] Q. Cheng, H. F. Ma, and T. J. Cui, "Broadband planar lüneburg lens based on complementary metamaterials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 18, pp. 181901-181903, Nov. 2009.
- [15] L. Zigoneanu, B.-I. Popa, and S. A. Cummer, "Design and measurements of a broadband two-dimensional acoustic lens," *Phys. Rev. B*, vol. 84, pp. 024305(1-5), Jul. 2011.
- [16] R. Q. Li, X. F. Zhu, B. Liang, Y. Li, X. Y. Zou, and J. C. Cheng, "A broadband acoustic omnidirectional absorber comprising positive-index materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 19, pp. 193507-193509, Nov. 2011.
- [17] A. Climente, D. Torrent, and J. Sánchez-Dehesa, "Omnidirectional broadband acoustic absorber based on metamaterials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 14, pp. 144103-144106, Mar. 2012.
- [18] *COMSOL Multiphysics 5.1*, Retrieved Oct. 10, 2017, from <http://www.comsol.com/>.
- [19] C. J. Naify, T. P. Martin, C. N. Layman, M. Nicholas, A. L. Thangawng, D. C. Calvo, and G. J. Orris, "Underwater acoustic omnidirectional absorber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 7, pp. 073505-073508, Dec. 2014.
- [20] S.-H. Kim, <https://www.youtube.com/watch?v=RVuaeGGwMZY>
- [21] S.-H. Kim, <https://www.youtube.com/watch?v=jPzrMC7wG3I>
- [22] S.-H. Kim, <https://www.youtube.com/watch?v=l45DwmL80Uc>

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 기관공학부 교수

<관심분야> 파동학, 메타물질, 수중통신

김 정 우 (Jung-Woo Kim)



2016년 : 목포해양대학교 메카트로닉스학부 재학 중

현재 : 목포해양대학교 메카트로닉스학부 재학 중

<관심분야> 메타물질, 수중음향

황 건 (Gunn Hwang)



1983년 : 고려대학교 기계공학과 학사

1985년 : KAIST 기계공학과 석사

1999년 : KAIST 기계공학과 박사

현재 : 한국전자통신연구원 융합센서연구그룹 책임연구원

<관심분야> 음향학, 메타물질, 수치해석