

# 수중음향 영상화를 위한 렌즈 제작 및 특성 평가

## Characteristics Evaluation of the Lens for Underwater Acoustic Imaging

조완호<sup>†</sup> · 권휴상\* · 조요한\*\* · 서희선\*\*

Wan-Ho Cho, Hyu-Sang Kwon, Yo-Han Cho and Hee-Seon Seo

(Received July 7, 2016 ; Revised August 22, 2016 ; Accepted August 22, 2016)

**Key Words** : Acoustic Lens(음향렌즈), Underwater Acoustic Imaging(수중음향 영상화), Polymethylpentene(폴리메틸펜텐), Equivalent Source Method(등가음원법)

### ABSTRACT

A series of process to design an acoustic lens for underwater imaging is reviewed and the method to evaluate characteristics of the lens is investigated. If the target specification of lens is given, the design process consists of the material selection, evaluation of its properties, lens geometry design, prediction of lens characteristics, manufacturing, and evaluation by measurement. In this study, an actual acoustical lens is made by cutting polymethylpentene block. The characteristics of lens are predicted by the hybrid method, combination of ray tracing and Rayleigh integral. For the direct comparison between the prediction and measurement results, a simulation method based on the equivalent source method is suggested to reflect the actual radiation pattern of transducer used for measurements. Finally, the measurement is conducted in a small water tank to observe the actual characteristics of the manufactured lens.

### 1. 서 론

수중 환경에서 영상화된 이미지를 얻기 위한 기술로는 위상 배열(phased array)에 기반한 방법들이 널리 사용되고 있으나, 이 방법은 기본적으로 많은 수의 신호 수집 채널과 신호처리 연산을 필요로 하기 때문에 광학영상과 동일한 품질의 이미지를 고속으로 얻는 데에는 한계가 있다. 이 때문에 근래에 들어서는 광학 카메라의 원리와 유사한 음향렌즈 기반의 영상화 기법들이 주목 받고 있다<sup>(1-8)</sup>.

음향렌즈 기반의 영상화의 기본 개념은 Fig. 1과 같다<sup>(1,4)</sup>. 위상 배열 방법의 경우 빔포밍을 이용하여

음향 신호를 집중하고 빔 조향을 통해 스캐닝을 수행하지만 렌즈 기반 영상화에서는 음향 렌즈가 이 역할을 대신하게 된다. 이 때문에 신호처리 과정 및 이에 필요한 회로 구성을 크게 간소화 할 수 있으며, 광학 카메라와 동일한 전면 영상을 획득하는 것이 가능한 장점이 있다.

그러나 이 때 사용되는 음향렌즈에 대한 설계 및 제작에 관한 내용들은 광학렌즈에 비하여 잘 알려져 있지 않다. 렌즈 재료의 선정이나 설계에 대한 방법론 등이 체계적으로 제안되기 보다는 주로 경험적인 노하우에 의해 초기 설계가 제안되며, 이 성능을 정확히 예측하는 방법에 대한 연구가 주로 이루어져왔다<sup>(5-8)</sup>.

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Korea Research Institute of Standards and Science  
E-mail : chowanho@kriss.re.kr

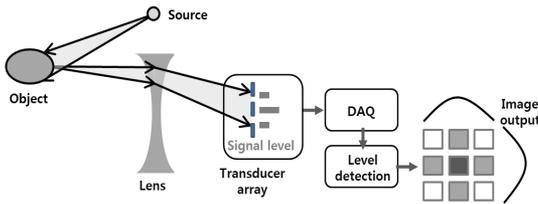
\* Member, Korea Research Institute of Standards and Science

\*\* Member, Agency for Defense Development

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



**Fig. 1** Basic concept of the lens-based acoustic imaging

이 연구에서는 수중음향 영상화 적용을 위한 일련의 렌즈 제작 과정을 제시하고, 제작된 렌즈의 특성을 확인하는 방법을 검토한다. 렌즈 제작 과정은 재료 선정, 물성치 실측, 형상 설계 및 가공의 순서로 구성 된다. 2장에서는 각 과정의 내용에 대하여 정리하고, 3장에서는 실제 예제를 통하여 제작된 렌즈의 성능을 확인한다.

## 2. 음향렌즈의 설계 과정

### 2.1 렌즈 재료의 선정

음향렌즈나 음향 웨지<sup>(9,10)</sup> 등의 피동형 파동 제어 방법은 서로 다른 음속을 갖는 매질을 전파 경로에 삽입하여 파면의 전달 방향을 제어하는 원리이다. 이들 매질의 선정에 있어 가장 중요하게 고려되어야 하는 음향학적 특성은 재료의 특성 임피던스(characteristic impedance)를 들 수 있으며, 아래와 같이 정의된다.

$$z = \rho_0 c. \tag{1}$$

이 때,  $\rho_0$ 는 매질의 밀도  $c$ 는 매질에서의 음속을 의미한다. 음향렌즈의 기본적인 요건은 필요한 굴절률을 가지면서도, 렌즈를 통하여 전달되는 음향 신호의 손실을 최소화하는 것이다. 굴절률은 다음과 같이 매질간 음속의 비에 의하여 결정된다<sup>(11)</sup>.

$$n = \frac{1}{\sin \theta_c} = \frac{c_2}{c_1}. \tag{2}$$

이 때,  $\theta_c$ 는 임계각을 의미한다. 그러나 입사되는 파동의 굴절각의 경우 렌즈의 곡률반경에 의해서도 조절이 가능하기 때문에 재료 측면에는 전달 매질과 특성 임피던스가 유사한 재료를 선정하여 임피던스

부정함에 의한 반사를 최소화 하는 것이 중요하다.

렌즈를 통하여 전달되는 음파의 손실에 관련된 인자로 감쇠계수가 있다. 감쇠로 인한 음파의 진폭 감소는 이동거리에 따라 지수적으로 감소하고, 평면파(plane wave) 모델에서 진행거리  $d$ 에 대한 파의 감쇠량은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$A = A_0 e^{-\alpha d}. \tag{3}$$

이 때,  $\alpha$ 는 감쇠계수 이다. 음향 렌즈 재료로 활용하기 위해서는 가능한 감쇠 계수가 작은 재료를 활용할 필요가 있다. 특히 수중 음향 영상화에서는 초음파 신호를 이용하기 때문에, 조금이라도 높은 신호대 잡음비를 확보하는 것이 필요하다.

초음파의 감쇠는 주파수와 매우 밀접한 관련이 있고, 주파수가 높아질수록 감쇠계수가 커진다. 일반적으로 초음파의 감쇠는 주파수의 제곱에 비례한다고 알려져 있으나<sup>(11)</sup>, 엄밀하게는 주파수마다 감쇠계수가 따로 측정되어야 할 필요가 있다. 또한, 동일한 원료에서도 성형 과정에 따라 많은 차이를 보이는 경향이 있으므로 실제 적용한 시편에 대한 실험을 수행하여야 정확한 감쇠계수의 정보를 얻을 수 있다.

### 2.2 재료의 물성치 측정

일반적으로 널리 쓰이는 재료나 상업적으로 구매가 가능한 재료의 물성치의 경우 문헌 자료 혹은 제조사에서 제공하는 물성치의 공칭값들이 존재한다. 그렇지만 실제 재료들의 경우, 성형이나 가공 과정에 따라 편차가 존재하기 때문에 공칭값들과 언제나 일치한다고 보기 어렵다. 이 때문에 필요에 따라서는 사용될 재료 시편의 물성치를 직접 측정하는 것이 필요하다.

음속 측정은 트랜스듀서를 면에 접촉 시켜 음파를 전송하고, 시편의 후면에서 다중 반사되어 도달하는 시간 차이를 측정하여 구할 수 있으며 일반적인 시스템 구성은 Fig. 2와 같다<sup>(12)</sup>. 트랜스듀서에서 음향 펄스를 발생시키면 음향버퍼-시편 경계 반사 신호, 첫 번째 후면 반사 신호, 두 번째 후면 반사 신호가 순차적으로 도달하며, 전체 전달 경로를 도달시간으로 나누어 음속을 계산하게 된다.

음속을 측정하기 위한 또 다른 방법으로 수중에

서의 측정 방법이 있다. 수중에서의 음속 측정을 위해서는 Fig. 3과 같이 송수신 트랜스듀서를 설치하고 사이에 측정하고자 하는 재료 시편이 있을 때와 없을 때의 시간 차이  $\delta t$ 를 측정하고 이를 이용하여 아래식과 같이 음속을 계산한다.

$$c_{test} = \frac{c_{water} L_{test}}{c_{water} \delta t + L_{test}} \quad (4)$$

이 때,  $c_{water}$ 는 물의 음속  $L_{test}$ 는 시편의 두께를 의미한다.

Fig. 2의 시스템 구성은 감쇠 측정에도 동일하게 사용될 수 있다. 가장 전통적인 측정 방법은 복수의 후면 반사 신호의 크기의 비를 가지고 감쇠 곡선을 추출하여 감쇠 계수를 구하는 방법이다<sup>(12)</sup>. 그러나 이 경우에 곡선을 도출하기에 충분한 수의 반사 회수 동안 신호 대 잡음비를 확보하는 것이 어렵다는 문제가 있다. 음향 버퍼를 이용하는 경우 감쇠계수는 다음의 식으로 구해진다<sup>(12)</sup>.

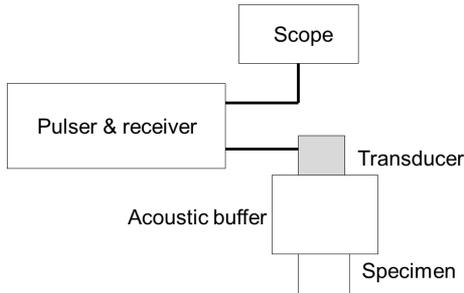


Fig. 2 Configuration to measure the longitudinal wave speed and attenuation coefficient of medium by contact method

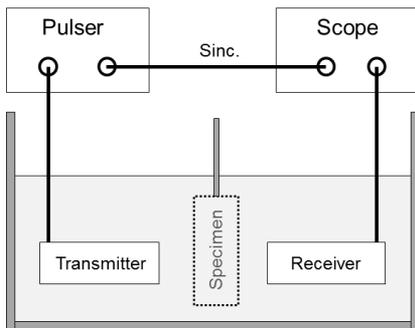


Fig. 3 Configuration to measure the longitudinal wave speed by immersive test

$$\alpha = \frac{1}{2T} \ln \frac{R}{E} \quad (5)$$

위 식에서  $T$ 는 시편의 두께,  $E$ 는 시편 후면에서 반사되어 도달하는 연속된 두 펄스의 크기 비이며,  $R$ 은 음향버퍼와 시편 사이의 반사계수로 다음과 같이 구해진다.

$$R = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \quad (6)$$

이 때,  $z_1, z_2$ 는 음향버퍼와 시편의 음향 임피던스이다. 음향 버퍼를 이용한 감쇠계수 측정에서는 음향 버퍼의 크기가 시편의 다중 반사 신호를 측정하는 동안 내부 반사가 없을 정도로 커야 하며, 자체 감쇠가 매우 적어야 한다<sup>(12)</sup>. 또한, 시편 역시 다중 반사신호가 명확히 구분이 되기 위해서 파장의 5배 이상 커야 한다. 이는 측정하고자 하는 주파수가 낮은 때는 상대적으로 더 큰 신호가 필요하다는 것을 의미하며, 이러한 사항들을 고려하여 시편의 크기와 음향버퍼를 선정한다.

### 2.3 렌즈의 설계 및 가공

실제 이미징을 위한 시스템을 구성하기 위해서는 하나의 렌즈로 구성하기 보다는, 일반적인 광학카메라와 같이 복수의 렌즈를 조합하여 이미지의 품질을 향상시키게 된다. 이러한 다중 렌즈계의 설계는 특정 사양에 대하여 단일한 최적 설계가 명확하게 주어지는 것이 아니며, 다양한 조합들이 사용될 수 있다. 실제로 광학렌즈의 경우에도 설계의 많은 부분 을 경험에 의존하는 경향이 강하다.

음향렌즈의 설계를 위해서는 기하음향학에 기반한 음선 추적법을 적용할 수 있다. 이는 광학 렌즈 설계 방법과 동일한 접근 방법이기 때문에 편리하게 적용될 수 있다. 음선의 전파를 3차원으로 표시하기 위해서는 다음과 같이 벡터 표현을 이용할 수 있다 (Fig. 4).

$$\vec{T} = r\vec{I} + (rV_1 - V_2)\vec{N} \quad (7a)$$

$$r = \frac{n_2}{n_1}, V_1 = \pm \vec{N} \cdot \vec{I}, V_2 = \sqrt{1 - r^2(1 - V_1^2)} \quad (7a,b,c)$$

여기서,  $\bar{N}$ 은 입사면에 대한 법선 벡터를 의미한다. 그러나 음선 추적만으로는 회절 등의 영향을 고려할 수 없으며, 빔 패턴이나 음압 분포 경향을 파악하기 어렵기 때문에, 과도 해석적 접근이 필요하다. 이 때문에 유한요소법이나 시간영역 차분법<sup>(6)</sup> 등이 적용되고 있으나, 연산량이 많기 때문에 최적 설계안을 도출하는 과정에서의 반복 해석에는 적합하지 않은 측면이 있다.

이러한 연산량을 줄이기 위한 방법으로 출구면 이후의 음장을 복수의 점음원에 대한 중첩으로 표현하는 복합 해석법(hybrid method)이 제안되었다<sup>(5)</sup>. 복합해석법은 렌즈 시스템을 통과하는 구간에서는 음선 추적법을 적용하고 매질에서 전파되는 구간에서는 Rayleigh 적분식을 이용하여 음장을 예측한다. 즉, 출구면에서의 음압 분포를 음선 해석을 통하여 도출하고 이 정보를 이상화된 렌즈면의 절점들에 도입하여 다음 식으로 음장 분포를 계산한다<sup>(5)</sup>.

$$P(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N \frac{\cos \theta_{t,n} + 1}{2} 10^{\frac{\alpha r(n)}{20}} \frac{e^{ikr(n)}}{r(n)} P_s(n), \quad (8)$$

이 때,  $P_s(n)$ 은  $n$ 번째 절점의 음원 강도,  $N$ 은 절점의 개수,  $r(n)$ 은  $n$ 번째 절점에서 관측점까지의 거리,  $\alpha$ 는 매질에서의 감쇠 계수이다.

음향렌즈를 거친 음파의 빔 형성 특성은 음향렌즈의 형상에 크게 의존한다. 따라서 음향렌즈는 복잡한 설계과정을 거쳐서 형상이 결정되고, 제작 또한 설계에 따라 정교하게 수행되어야 한다. 따라서 복잡한 형상을 가공이 가능한 재질이 선정되어야 한다. 즉, 복잡한 형상의 가공을 위한, 금형 및 절삭, 연마 등 다양한 가공 과정을 거칠 수 있도록 가공성이 우수한 재료의 선정이 중요하다. 또한, 재질의

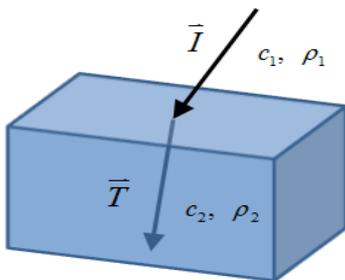


Fig. 4 Description of ray vector

균질성(homogeneity)과 등방성(isotropy)의 확보 역시 매우 중요하다. 제작된 렌즈는 내부 각 부위에서 음파 전파 성능이 동일해야 하며, 전파 방향에 따른 음파의 전파 특성 또한 동일해야 한다.

### 3. 제작 예제

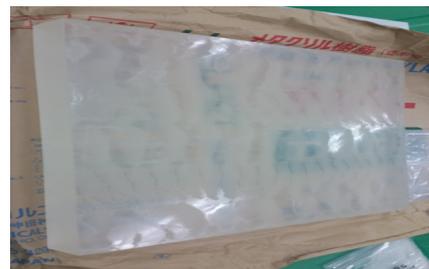
#### 3.1 폴리메틸펜텐의 특성

해외의 개발 사례에서 보면 음향 렌즈 재료로 폴리메틸펜텐(polymethylpentene)을 많이 사용하는 것으로 알려져 있다<sup>(13,14)</sup>. 이 재료는 TPX(transparent polymer X)로도 불리며, 내화학성, 내열수성, 전기 특성 등이 우수하고 가공이 용이하여 의료, 식품용기, 공업자재, 가전제품, 음향제품 등에 유리금속이나 다른 수지의 대체 재료로서 주로 사용된다. 일반적으로 알려진 밀도는 828 kg/m<sup>3</sup>, 음속의 공칭값은 약 1800 m/s로 특성 임피던스는 물과 1% 정도 적은 차이를 가지면서 음속은 20% 이상 차이가 나기 때문에 렌즈재료로서 적합하다고 할 수 있다.

폴리메틸펜텐은 Fig. 5(a)와 같이 입자의 형태로 판매되는 것이 일반적이며 목적과 용도에 따라서 Fig. 5(b)와 같이 판형이나 다른 형태로 성형하여 가



(a) Polymethylpentene particle



(b) Polymethyl-pentene plate

Fig. 5 Formation of polymethylpentene

공한다. 재료의 특성은 성형 방법이나 성형과정에서의 열처리 환경에 영향을 받을 수 있기 때문에 정밀한 설계를 위해서는 성형된 재료에 대하여 직접 물성치를 측정하는 것이 바람직하다.

### 3.2 재료의 물성치 실측

폴리메틸펜틴의 음속 및 감쇠 특성 측정을 위하여 다음과 같이 실험장치를 구성하였다. 초음파 가진을 위한 펄서/리시버로 복수의 정현파 가진이 가능한 RAM-5000 (RITEC. INC) 장비를 사용하였다. 또한 초음파 트랜스듀서는 좁은 대역폭의 5 MHz 종파 탐촉자(PANAMETRICS. INC)를 사용하였다. 음향 버퍼로는 감쇠가 적고 선형성이 좋은 Pyrex glass를 사용하였다. 사용된 음향 버퍼의 크기는 50 mm 이다. 탐촉자와 음향버퍼, 시편은 액체 접촉매질을 이용하여 접촉하였다. 이와 같은 방법으로, Fig. 5(b)의 판재에서 잘라낸 시편 5종에 대하여 2회씩 측정을 수행하였으며, 5 MHz의 주파수 분석에 용이하게 4주기의 정현파를 발생시키면서 신호를 측정하였다. Fig. 6은 실험장치의 구성을 보여주고 있다.

이와 같은 방법으로 각 시편에 대하여 측정된 종파 속도는 Table 1과 같다. 결과에서 보면 측정 반복성에 의한 편차보다 측정 위치(잘라낸 서로 다른

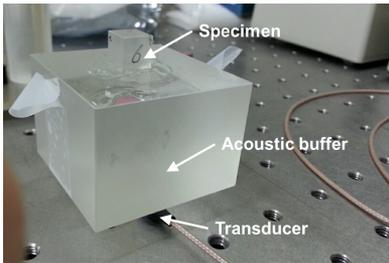
시편)에 따른 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 이 경우에서는 위치에 따라 5% 이상 차이를 보이는 경우도 있는 것을 알 수 있으며, 설계 시 이러한 부분을 감안할 필요가 있다.

그러나 이와 같은 접촉식 측정 방법의 경우 접촉면의 경계조건 등에 의하여 음속이 변화하는 문제가 있다<sup>(15)</sup>. 그러므로 실제 렌즈가 사용되는 환경인 수중 환경에서 측정된 음속을 적용하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

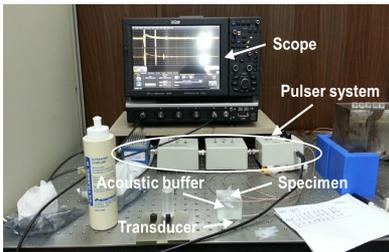
수중에서의 음속 측정을 위하여, 3×2×1.5 m 크기의 수조에 Fig. 7과 같이 측정 시스템을 구성하였다. 음원 트랜스듀서로는 64채널 선형 어레이 트랜스듀서의 가운데 셀을 이용하였으며, 셀의 폭은 1.6 mm, 공진주파수는 1 MHz였다. 인가 신호는 스파이크 펄스를 사용하였다. 시편은 135 mm×100 mm×16.6 mm로 판형 가공된 폴리메틸펜틴을 이용하였다. 리시버로는 precision acoustics의 니들 하이드로폰을 사용하였다.

트랜스듀서와 리시버 간의 거리를 직접 잴 경우 오차가 발생할 수 있기 때문에, 처음 측정시에는 임의로 설치하여 측정하고 순차적으로 10 cm 간격으로 멀어지게 하면서 총 7개 위치에서 측정하였다. 추가적으로 시편의 물성 균일도를 확인하기 위하여, 시편을 음파 전달 방향에 수직한 방향으로 2 cm 씩 이동시켜 가면서 5개 지점에서 측정을 수행하여, 총 35개 경우에 대하여 평균을 취하였다.

Fig. 8은 측정된 신호의 예를 보여주고 있다. 시간 지연을 측정하기 위해서 최댓값 비교와 일반화된 상호 상관 계수(generalized cross-correlation, GCC)법 두 가지를 이용하였다. 음파의 전파가 완벽하게 선형적이라고 한다면, 공간 전파에 따른 변형이 없기 때문에 파형의 특정 지점만을 비교하여도 정확한 시간



(a)



(b)

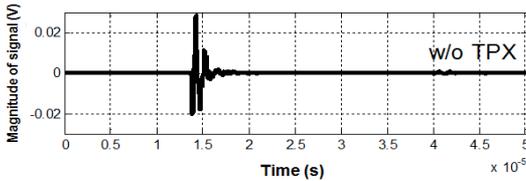
Fig. 6 Contact measurement setup to measure the material properties of polymethylpentene

Table 1 Measured longitudinal wave speed (m/s) of the polymethylpentene specimen by contact method

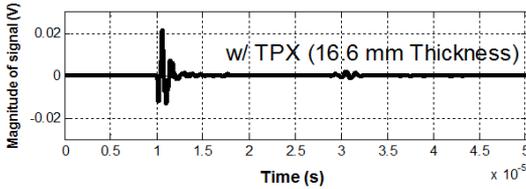
	Pt. 1	Pt. 2	Pt.3	Pt. 4	Pt. 5	Ave.	Std.
1st	2153.5	2104.8	2061.3	2153.3	2175.6	2129.7	46.2
2nd	2109.4	2083.4	2034.5	2143.5	2193.2	2112.8	60.0
Ave.	2131.4	2094.1	2047.9	2148.4	2184.4	2121.3	51.3
Diff.	44.1	21.4	26.8	9.8	-17.6	16.9	22.9



Fig. 7 Immersion test setup to measure the longitudinal wave speed of the polymethylpentene



(a) Without specimen



(b) With specimen

Fig. 8 Measured waveform with the system in Fig. 7

차이를 얻을 수 있다. 그러나 주파수별 감쇠 차이, 시편 내부에서의 진단파 변환 등의 다양한 영향에 의하여 파형의 변화가 존재할 수 있다. 이 때문에 파형간의 상관성을 기반으로 시간차를 계산하는 GCC 방법이 보다 정확한 결과를 줄 수 있다.

Table 2는 수조에서 측정된 신호에서 얻어진 음속 값을 보여주고 있다. 결과에서 보면 최댓값 위치를 이용한 경우와 GCC를 이용한 경우간에 차이를 크지 않은 것을 알 수 있으며, 음파의 통과 위치에 대해서 표준 편차가 21 m/s 정도로 나타났다. 접촉식으로 측정된 경우와 비교할 때 약 2.5% 정도의 차이를 보이고 있으며, 시편의 불균일성에 의해 발생하는 편차보다 높은 수준임을 고려할 때, 적용환경과 동일한 측정 조건에서 측정된 값을 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

감쇠 계수는 접촉식 음속 측정에 사용된 시스템

Table 2 Measured longitudinal wave speed of the polymethylpentene specimen by immersion test

Point	Mean speed of sound (m/s)	
	Peak position	GCC
Pt. 1	2180	2182
Pt. 2	2165	2167
Pt. 3	2153	2155
Pt. 4	2196	2199
Pt. 5	2210	2212
Average	2181	2183
Std.	20.9	20.8

Table 3 Measured attenuation coefficient of the polymethylpentene specimen (dB/m)

	x-direction	y-direction	z-direction
Average	0.796	0.779	0.731
Std.	0.155	0.106	0.087

을 이용하여 2.2절에 설명된 방법으로 측정하였다. 방향성을 확인하기 위하여 육각 시편을 3방향으로 돌려가면서 각각 측정을 수행하였다. 감쇠 계수의 경우 주파수의 함수이기 때문에 실제 사용하는 주파수의 신호로 측정을 수행할 필요가 있다. 렌즈기반 영상화 과정에서는 주로 1 MHz대역이 많이 사용되지만 이 경우 파형을 관찰하기 위한 시편의 크기가 커져야 하기 때문에 이 연구에서는 5 MHz에서 측정을 수행하고 이 값을 통하여 1 MHz에서의 값을 근사적으로 유추하였다.

Table 3에는 측정된 감쇠 계수의 평균값과 표준편차를 보여주고 있으며, 전반적으로 0.6 dB/m에서 0.9 dB/m의 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 일반적으로 감쇠는 주파수의 제곱에 비례하므로 이를 1 MHz 주파수에서 환산하여 보면 약 0.024 dB/m에서 0.036 dB/m 정도의 분포를 갖는다. 이 값은 거리 1 m 당 0.13 dB 감쇠하는 것이므로 물에 비해서 더 적은 감쇠계수를 갖는다고 할 수 있다. (물은 1 m 당 약 0.2 dB 감쇠<sup>(16)</sup>). 따라서, 폴리메틸펜텐의 감쇠계수는 상당히 적기 때문에, 감쇠 측면에서는 음향렌즈 재료로서 적합하다고 할 수 있다. 일반적으로 음향렌즈의 두께가 50 mm 내외라고 가정하면 음향렌즈 내부에서 초음파 진폭감소가 0.007 dB 정도로 매우 적으므로 렌즈 내부에서의 감쇠는 실질적으로 무시

할 수 있다고 할 수 있다.

### 3.3 렌즈 특성의 예측

렌즈 특성에 대한 예측 및 측정에 관한 예제로 입사 방향에 대하여 곡률반경이 284.3 mm, 전달 방향으로 100 mm인 음향렌즈를 실제 제작하고 그 특성을 실측하였다. 실제 렌즈 설계에서는 2장에서 언급한 시뮬레이션 과정을 통하여 적합한 곡률반경을 찾는 과정을 거치게 되지만, 이 연구는 특정 사양을 만족하는 렌즈를 설계하는 것이 아닌, 렌즈 제작에 필요한 일련의 과정을 검토하는 것이기 때문에 위에 주어진 렌즈의 시뮬레이션 결과와 실측결과를 비교하는 것으로 대체한다.

일반적인 음향렌즈 시뮬레이션에서는 점음원 혹은 평면파 입사를 가정하여 시뮬레이션을 수행한다. 이는 초음파 음원이 무지향성이고 렌즈로부터 충분히 먼 거리에 위치하는 경우에 비교적 유사한 상황을 만들 수 있다. 그러나 실제 실험에 사용되게 되는 초음파 트랜스듀서의 경우 높은 주파수 대역으로 인하여 무지향성으로 가정하기 어렵다. 예를 들어 널리 사용되는 형태의 트랜스듀서인 직경 1.5 cm의 피스톤 형태의 음원의 경우 1 MHz 주파수에 대한 헬름홀츠수는 수중에서 60 이상으로 매우 높은 지향성을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 빔을 평면파의 형태로 렌즈 전체에 도달하게 하기 위해서는 수 m 이상의 거리가 필요하기 때문에 이러한 크기의 수조를 확보하는 것은 쉽지 않다. 이 때문에 실험결과와의 비교를 위해서는 시뮬레이션 과정에서 실제 음원 특성을 반영할 필요가 있다.

이를 위해서 서로 다른 강도의 점음원의 중첩으로 특정 음원을 모델링하는 등가음원법(equivalent source method, ESM)<sup>(17,18)</sup>을 적용할 수 있다. 실제 음원과 같은 크기를 갖는 강체 피스톤의 메인로브 폭 및 사이드로브 위치를 정확히 모사할 수 있도록, 전체 1.5 cm 길이로 등간격 배치된 32개의 점음원을 이용하였으며, 최소자승해를 이용하여 음원 강도를 결정하면 Fig. 9와 같이 지향특성을 정확하게 모사할 수 있다. 그러므로 이 32개의 음원에 대하여 각각 복잡해석법을 통하여 음장분포를 구하고 이를 중첩하면 실제 음원에 의해 형성되는 음장을 예측하는 것이 가능하다.

Fig. 10은 (-0.4 m, -0.03 m)에 음원이 위치할 때,

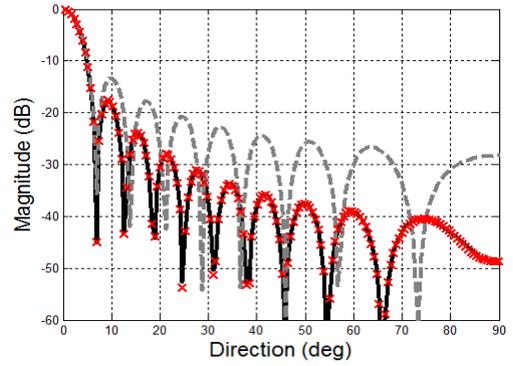
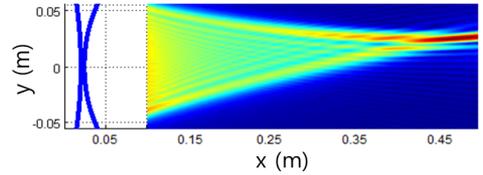
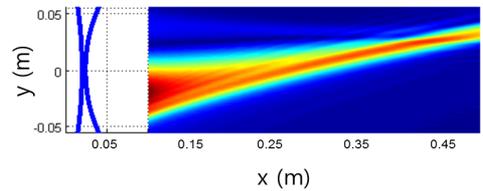


Fig. 9 Comparison of beam patterns between the rigid piston with 1.5 cm diameter and equivalent source model. —, rigid piston; ---, 32 sources with unit input; ×, 32 sources with estimated source input by ESM



(a) Point source



(b) Modelled rigid piston source

Fig. 10 Simulated sound field induced by the lens with: point source, modelled rigid piston source

점음원으로 가정한 경우와 실제 음원 모델을 이용한 경우를 비교하고 있다. 점음원의 경우 렌즈 전체에 음선이 통과하고 있기 때문에 초점에서의 집중이 분명하게 드러나고 있으나, 실제 음원의 경우는 렌즈의 일부에만 음파가 통과하기 때문에 굴절되어 전파하는 형태에 가깝게 나타나고 있다.

### 3.4 렌즈 특성의 실측

폴리메틸렌틴은 가공성이 좋은 재료이나 합성 수지 계열이기 때문에 연삭가공 등의 성형과정에서 열변형 등이 발생할 수 있고 재료가 무르기 때문에 금

속과 같은 정밀가공이 불가능하다. 이로 인하여 실제 제작된 렌즈의 형상이 설계와 차이를 가질 수 있다.

이를 확인하기 위하여 Fig. 11과 같이 형상 측정을 수행하였으며 측정된 렌즈의 치수는 Table 4와 같다. 결과에서 보면 렌즈의 곡률 반경이 1%에서 3% 정도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 곡률 편차는 비교적 작은 편이기 때문에 실측값을 가지고 성능을 보정하는 것이 가능하다.

렌즈에 의하여 형성되는 음장을 실측하기 위하여 3.2절에 사용된 수조 시스템을 이용하였으며, 동일

한 트랜스듀서 및 리시버를 이용하여 측정을 수행하였다.

실측음장과 예측 음장의 비교를 위하여 16개의 등가 음원을 이용하여 트랜스듀서를 등가음원으로 모델링하였으며, 재구성된 모델의 지향특성을 Fig. 12와



Fig. 11 Setup to measure the lens shape

Table 4 Measured dimension of the lens(mm)

Designed curvature	Best fit of radius of curvature	Standard deviation	Difference
100	98.8	0.009	1.2
284.3	291.2	0.004	7.1

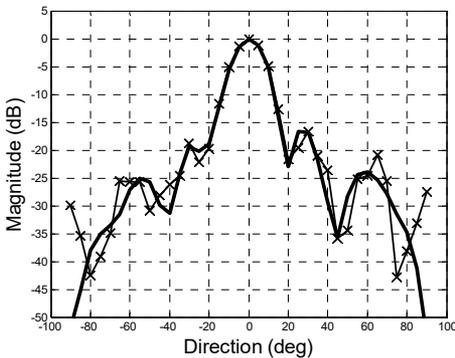
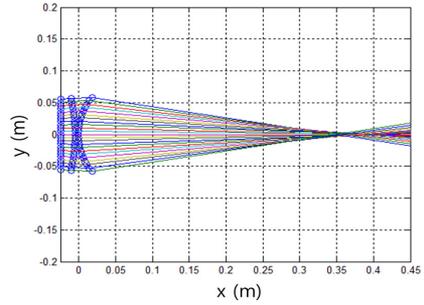
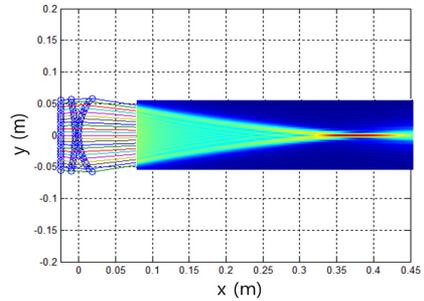


Fig. 12 Comparison of the beam patterns between the measured beam pattern (—x—) and the reconstructed beam pattern with 16 sources with estimated source input by ESM (—)



(a) Ray tracing result



(b) Hybrid method result

Fig. 13 Predicted sound field with the equivalent source model

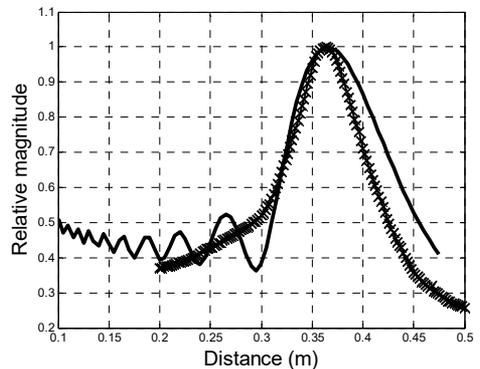
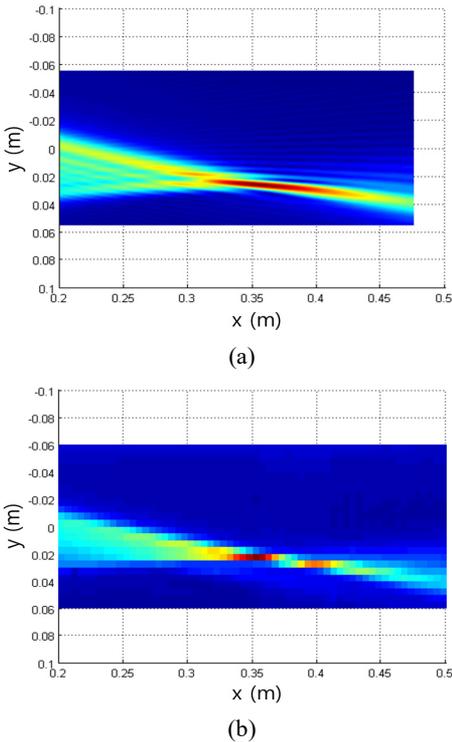


Fig. 14 Comparison of the relative sound pressure on the axis of propagating direction between the measured pressure (—x—) and the predicted beam pattern with 16 sources with estimated source input by ESM (—)



**Fig. 15** Comparison of the sound field distribution induced by the acoustic lens with the transducer at (-0.5 m, -0.04 m)

같다. 결과에서 보면 등가음원 모델이 메인 로브 부분은 실제 음원의 특성을 정확히 묘사하고 있으며 나머지 부분에서도 전반적인 경향이 유사함을 알 수 있다. 이러한 등가음원 모델을 적용하여 복합해석법으로 렌즈의 음장을 예측한 결과는 Fig. 13과 같다. 트랜스듀서의 위치는 렌즈에서 0.5 m 거리로 하였으며, 이때의 초점 위치는 렌즈 중심에서 0.365 m로 예측되었다.

예측된 결과와 실측 결과를 비교하여 예측을 타당성을 검토하였다. Fig. 14는 렌즈 중심에서 음파의 전파방향 축에서 측정된 결과와 예측 값을 비교한 결과를 보여주고 있다. 신호의 크기는 각 경우의 최대값에 대한 상대치로 나타내었으며, 측정 및 예측 점의 간격은 2 mm이다. 초점 위치의 경우 두 결과 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

트랜스듀서가 렌즈 중심 기준으로 (-0.5 m, -0.04 m)에 위치할 때, 형성되는 음장을 예측한 결과 및 실측된 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 예측의 경우

0.5 mm 간격으로, 측정은 5 mm으로 수행하였으며, 실측된 분포가 예측된 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

경사 입사에 의하여 형성되는 음장은 화각(field of view)의 가장자리 영상의 품질과 관련되는 부분이기 때문에 특성을 정확히 평가하는 것이 필요하다. 위에 제안된 방법과 같이 실제 음원 조건을 모사할 수 있는 방법은, 다양한 음원(피사체) 조건에 따른 영향을 검토하는 데에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 수중음향 영상화 적용을 위한 일련의 렌즈 제작 과정을 제시하고, 제작된 렌즈의 특성을 확인하는 방법들을 검토하였다. 주어진 사양의 렌즈를 제작하는 과정은 재료 선정, 재료의 물성치 측정, 형상 설계 및 예측, 가공 그리고 성능 확인으로 구성된다. 이 연구에서는 폴리메틸펜틴 재료를 성형하여 실제 렌즈를 제작하였고, 복합해석법을 적용하여 렌즈의 특성을 예측하였다. 이 과정에서 실제 실험 조건에서 사용되는 트랜스듀서의 특성을 반영하여 시뮬레이션을 수행하기 위하여 등가음원법을 적용하였다. 또한 제작된 렌즈의 특성을 실제 측정을 통하여 확인하였으며, 등가음원법을 적용하여 예측된 결과와 실측 결과가 유사하게 나타남을 확인하였다.

#### 후 기

이 연구는 국방기초연구 사업(ADD-11-01-01-01) 및 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-민군기술협력사업 (No. NRF-2014M3C1A906 0857)의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### References

(1) Tsukioka, S., Aoki, T., Ochi, H., Shimura, T., Sawa, T., Nakamura, T. et al., 2002, Development of an Acoustic Lens for an Imaging Sonar for Autonomous Underwater Vehicle “Urashima” and Experimentation in a Water Tank, Japanese Journal of Applied Physics,

Vol. 41, No. 6A, pp. 3970~3973.

(2) Belcher, E., Gallagher, D., Barone, J. and Honaker, R., 2003, Acoustic Lens Camera and Underwater Display Combined to Provide Efficient and Effective Hull and Berth Inspections, Proceedings of Oceans '03 Conference, pp. 1361~1367.

(3) Nakamura, T., Sato, Y., Kamakura, T. and Anada, T., 2004, Sound Pressure Fields Focused Using Biconcave Acoustic Lens for Normal Incidence, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 5B, pp. 3163~3168.

(4) Scroggins, D., Kamgar-Parsi, B., Folds, D. and Belcher, E., 1993, 3-D Acoustic Imaging with a Thin Lens, Proceedings of Oceans '93 Conference, pp. 444~449.

(5) Fink, K., 1994, Computer Simulation of Pressure Fields Generated by Acoustic Lens Beamformers, MS thesis, University of Washington.

(6) Mori, K., Nakamura, T., Yokoyama, T. and Hasegawa, A., 2005, 3-D FDTD Analysis of Sound Field Focused by Biconcave Acoustic Lens for Normal Incidence, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 6B, pp. 4696~4701.

(7) Sato, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N. and Nakamura, T., 2009, Design for Aplanatic Fresnel Acoustic Lens for Underwater Imaging, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 7, 07GL04.

(8) Mori, K., Ogasawara, H., Nakamura, T., Tsuchiya, T. and Endoh, N., 2011, Design and Convergence Performance Analysis of Aspherical Acoustic Lens Applied to Ambient Noise Imaging in Actual Ocean Experiment, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, 07HG09.

(9) Joo, Y.-S., Park, C.-G., Lee, J.-H., Kim, J.-B., and Lim, S.-H., 2011, Development of Ultrasonic Waveguide Sensor for Under-sodium Inspection in a Sodium-cooled Fast Reactor, NTD&E International, Vol. 44, No. 2, pp. 239~246.

(10) Joo, Y.-S., Bae, J.-H., Kim, J.-B. and Kim, J.-Y., 2013, Effects of Beryllium Coating Layer on Performance of the Ultrasonic Waveguide Sensor, Ultrasonics, Vol. 53, No. 2, pp. 387~395.

(11) Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A. and Sanders, J., 2000, Fundamental of Acoustics, 4th edition, John Wiley and Sons Inc.

(12) Birks, A. and Green, R., 1991, Nondestructive Testing Handbook Volume 7 - Ultrasonic Testing, American Society for Nondestructive Testing.

(13) Belcher, E., Matsuyama, B. and Timbre, G., 2001, Object Identification with Acoustic Lenses, Proceedings of Oceans 2001 Conference, pp. 6~11.

(14) Belcher, E., Hanot, W. and Burch, J., 2002, Dual-frequency Identification Sonar(DIDSON), Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, pp. 187~192.

(15) Treiber, M., Kim, J.-Y., Jacobs, L. and Qu, J., 2009, Correction for Partial Reflection in Ultrasonic Attenuation Measurements Using Contact Transducers, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 125, No. 5, pp. 2946~2953.

(16) Blackstock, D., 2000, Fundamentals of Physical Acoustics, John Wiley and Sons Inc.

(17) Koopmann, G., Song, L. and Fahline, J., 1989, A Method for Computing Acoustic Fields based on the Principle of Wave Superposition, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 86, No. 6, pp. 2433~2438.

(18) Fahline, J. and Koopmann, G., 1991, A Numerical Solution for the General Radiation Problem based on the Combined Methods of Superposition and Singular-value Decomposition, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 5, pp. 2808~2819.



**Wan-Ho Cho** received M.S. and Ph.D. degree in Mechanical Engineering at KAIST. He is currently working at Korea Research Institute of Standards and Science as a senior researcher. His research interests are in the area of acoustic metrology, sound field control, and acoustical array system. He also interest in the product sound quality (PSQ) and noise control.