

# FEM을 이용한 맨드렐(Mandrel)형 광-음향 수중 청음기의 설계에 관한 연구

## Design studies for mandrel type fiber-optic hydrophones with FEM

임종인\*, 노용래\*  
(Jong-in Im\*, Yong-rae Roh\*\*)

### 요약

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 작동 주파수 대역이 10kHz까지 이고, 무지향성 감도 특성을 갖는 광음향 변환 맨드렐(mandrel)형 하이드로폰의 최적 구조를 설계하고자 하였다. 최적화 변수들은 유연성 구조물인 맨드렐의 형상과 청음기의 각부분 물성들이다. 맨드렐의 반경보다 길이 혹은 몰딩(molding) 두께가 증가할수록 광-음향 수중 청음기의 감도는 증가하였고, 맨드렐과 몰딩의 탄성 계수 및 포아손 비가 낮을수록 감도가 향상되는 경향을 보여주었다. 그리고 맨드렐 재료의 길이가 감소할수록 혹은 탄성율이 증가할수록 사용 주파수 영역이 증가하고, 하이드로폰의 길이가 짧을수록 감도의 무지향 특성이 향상 되었다. 이상의 결과를 이용하여 감도가  $30 \times 10^{-7}$  Rad./Pa에 이르고, 작동 주파수 대역이 10 kHz 까지이며 5 kHz 주파수에서 무지향성을 갖는 유연성 구조물인 맨드렐형 광음향 하이드로폰을 설계하였다.

### ABSTRACT

This paper describes structural optimization of optical fiber-wound mandrel hydrophones with Finite Element Method (FEM). The hydrophone is supposed to have operation frequency range of up to 10 kHz and show omni-directional sensitivity pattern at 5 kHz. Studied parameters are mandrel geometry, molding thickness, and material properties of constitutional parts of the hydrophone. Theoretical calculation result shows that pressure sensitivity of the hydrophone increased as either mandrel length or molding thickness gets larger. Also higher pressure sensitivity requires a mandrel or molding material with relatively low Young's modulus or Poissons ratio. Hydrophone bandwidth increases either as the mandrel length becomes shorter or as the mandrel becomes harder. The omni-directional characteristic is improved as the mandrel length becomes shorter, at 5 kHz. With the above results, we determine the structure of an optical fiber-wound mandrel hydrophone which has the pressure sensitivity of  $30 \times 10^{-7}$  Radians/Pa, operation frequency range of up to 10 kHz, and shows omni-directional sensitivity pattern at 5 kHz.

### I. 서론

광음향 변환 하이드로폰 시스템은 인가된 외부 음향 신호에 의해 광섬유가 변형하게 되고, 광섬유 내부로 전파하는 광 신호의 특성 변화를 적절한 신호처리함으로써 인가된 음향신호를 분석하는 장치이다. 전체 시스템의 구성과 광신호 방법에 따라 광음향 변환 하이드로폰은 간섭(Interferometer)형, 분광(Polarization)형, 광강도(Optical Intensity)형, 감쇄장 (Evanescent field)형, 하이브리드 (Hybrid)형 등으로 분류된다. 그리고 음향 감지부의 구조

에 따라 2차원적인 음압 분포를 알 수 있는 평면 배열(planar array)형, 모든 방향에서 오는 신호를 수신할 수 있는 무지향성(omnidirectional)형, 인접한 두 측정 점간의 음압 변화 정도를 감지할 수 있는 구배(gradient)형, 그리고 직선상의 여러 점에서 동시에 측정이 가능한 선 배열(line array)형 등이 있다. 또한 음향신호의 측정 주파수 대역에 따라서 분류할 경우, 통상 1kHz 이하의 저주파 대역에서는 정 수압을, 수십 kHz 이하의 대역에서는 음압과 음압 구배를, 그리고 그 이상의 초음파 대역에서는 광 모드(optical mode)와 음압 모드의 분포를 측정할 수 있는 다양한 음향 감지부를 이용하고 있다. 이러한 광섬유 수중 음향 센서는 기존의 압전형 음향 센서에 비해 감도가 높고, 극한 조건에도 사용될 수 있으며 사용 주파수 대역의 조정이 용이성 등의 장점을 가지고 있다. 그러므로

\* 포항산업과학연구원 기능세라믹팀

\*\* 경북대 전자공학과/센서공학과

접수일자: 1997년 1월 29일

현재의 음향 탐지 시스템을 보완할 수 있는 유망한 소자로서 주목을 받고 있으나 기존의 압전형 혹은 자왜형 하이드로폰과는 완전히 다른 설계 개념 및 기법이 필요하다.

광 섬유를 이용한 광-음향 하이드로폰중에서 수십 kHz 까지 사용 가능한 센서는 코팅된 광섬유 센서와 맨드릴형 센서이다<sup>2,3</sup>. 이 중 Africk<sup>13</sup>이 발표한 맨드릴형 센서의 경우 유연성 구조물인 맨드릴에 광섬유를 적절히 배치한 구조로 형성되고, 제조의 편리성과 고감도 특성을 지니고 있어 이에 대한 연구가 이루어 졌다. 그러나 기존 연구의 경우 광섬유 및 몰딩을 제거하고, 테프론 및 나일론 등의 플라스틱 재료로 음향 감지부인 맨드릴에 대해서만 단순한 해석적 방법으로 광 음향 변환 특성을 규명하여 그 체계성이 부족하다<sup>14-16</sup>. 그러므로 고감도의 맨드릴형 하이드로폰을 개발하기 위하여서는 맨드릴 및 몰딩 등의 모든 구성 부품에 대한 재료와 형상 변수들에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 광섬유 하이드로폰의 광-음향 변환 특성을 규명하고, 유한 요소법을 이용하여 외부 음압에 따른 맨드릴 하이드로폰의 감도, 주파수 특성, 지향성 등 반응 특성 해석함으로써 구성 부품의 재료 및 형상 변수들을 최적화하여 1 $\mu$ Pa 대비 최소 -32dB 이상의 감도를 가지는 무지향성 광음향 변환 맨드릴형 하이드로폰의 최적 구조를 설계 하고자 하였다.

## II. 맨드릴형 광섬유 센서의 구조 및 광-음향 변환 특성

본 연구의 대상인 광음향 맨드릴형 하이드로폰은 그림 1에 나타난 것과 같이 수십 kHz 이하의 대역에서 채택되고 있는 유연한 탄성체인 맨드릴 감지부 주위에 광섬유가 감겨져 있는 형태이고, 맨드릴과 광섬유, 그리고 몰딩층으로 구성된다<sup>11, 3</sup>. 외부에서 음향신호가 하이드로폰에 인가되면 탄성체인 맨드릴이 음압에 반응하여 변형되고, 맨드릴을 감싸고 있는 광섬유가 변형하게 된다. 이에 의해 광섬유 내를 전파하고 있는 광 신호에는 광섬유의 변형량에 비례하는 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 이 위상차를 측정함으로써 외부에서 인가된 음향신호를 분석할 수 있다. 이러한 맨드릴 하이드로폰은 다른 구조들에 비해 기구적으로 튼튼하여 요동을 일으키는 수중에서도 측정이 용이하고, 비교적 높은 감도와 신뢰성을 가진다. 그리고 사용되는 탄성체와 몰딩의 재료, 그리고 광섬유가 감기는 길이, 맨드릴의 길이와 직경, 몰딩의 두께 등의 물성과 형상적인 가변 요소들을 적절히 조정함으로써 주파수 대역과 감도 등의 요구되는 사양에 적절히 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

광음향 맨드릴 하이드로폰의 감도는 단위 음압이 인가될 때 광섬유 단위 길이당 광파의 위상차로 표시된다<sup>11</sup>.

광섬유 길이가  $l$ 인 경우 맨드릴 하이드로폰의 감도는 다음과 같이 유도할 수 있다.

수중에서 음압이 인가될 경우 발생하는 광파의 위상차는 식 (1)와 같이 광섬유의 길이 변화와 굴절을 변화, 그리고 광섬유의 직경 변화에 의하여 발생하는 위상차의 합으로 표시 된다<sup>15</sup>.

$$\Delta\phi = \beta \cdot \Delta l + \frac{d\beta}{dn} \cdot \Delta n + \frac{d\beta}{dD} \cdot \Delta D \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 광파의 위상,  $\beta$ 는 광의 전파 상수,  $n$ 은 광섬유의 굴절율, 그리고  $k$ 는 광의 파수 (wave number),  $l$ 은 광섬유의 길이,  $D$ 는 광섬유의 직경을 의미한다.

그리고 원통 좌표계를 사용할 경우 식(1)의 광파이버의 길이 변화 및 굴절을 변화에 의한 전파 상수의 변화는 다음 식 (2)과 (3)과 같이 표시된다.

$$\Delta l = N \cdot (\Delta r \cdot \theta + r \cdot \Delta \theta) \quad (2)$$

$$\frac{d\beta}{dn} = \frac{d(n \cdot k)}{dn} \approx k \quad (3)$$

식(2)에서  $N$ 은 탄성체인 맨드릴에 광파이버가 감긴 횟수를 의미한다.

광-변형 효과를 표시하는 optical indicatrix는 식(4)와 같다<sup>17</sup>.

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^6 P_{ij} \epsilon_j \quad (4)$$

$P_{ij}$ 는 광-탄성 상수 이고, 광섬유는 등방성 물질인 균일한 유리로 제조되므로 두개의 독립적인 광-탄성 상수만 존재한다. 또한 균일하고 등방성인 광섬유에 전단 변위 성분은 존재하지 않는다고 생각할 수 있으므로 식(4)에서  $i, j=1, 2, 3$ 인 경우만 고려하면 된다. 그러므로 식(4)의 광 탄성 상수  $P_{ij}$ 는 식(5)와 같이 행렬식으로 표시된다.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$x$  혹은  $y$  방향으로 편광된 빛이  $z$ 축 방향으로 광섬유를 통과할 경우 광섬유의 변형에 의한 빛의 굴절을 변화는 식 (6)과 같다<sup>18</sup>.

$$\Delta n_z = -\frac{n^3}{2} \cdot \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{x,y} = -\frac{n^3}{2} [p_{11} \cdot \epsilon_x + p_{12} \cdot (\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (6)$$

그리고 식 (1)의 3번째 항은 광섬유의 반경 변화 때문에 발생하는 waveguide 모드의 전파 상수의 변화를 의미하며 waveguide 모드를 묘사하는 변수에 의해 계산할 수 있다. 그러나 앞의 두 항과 비교하여 그 기여도가 아주 적으므로 무시 가능하다<sup>16</sup>.

식 (2), (3), (6)을 식(1)에 대입하고, 원통형 좌표를 사용하여 정리하면 식 (7)과 같이 맨드릴 하이드로폰의 감도

를 계산하는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \sum \epsilon_r + \sum \epsilon_0 - \frac{n^2}{2} \left\{ \rho_{11} \cdot \sum \epsilon_r + \rho_{12} \cdot (\sum \epsilon_0 + \sum \epsilon_z) \right\} \quad (8)$$

### III. 광섬유의 등가 물성

그림 1에 나타난 유연성 구조물인 맨드릴을 이용한 광음향 하이드로폰의 유한 요소 모델링시 광섬유를 상세하게 묘사할 경우 해석 시간 및 결과의 정확도 면에서 어려운 점이 많으므로 등가 물성을 계산하여 사용하여야 한다. 즉, 개개 광섬유를 유한요소 모델에서 하나의 요소로 나타낸다면 상대적으로 구조가 간단한 맨드릴의 경우 불필요하게 상세하게 묘사되어서 모델의 크기가 지나치게 커지게 된다. 본 연구에서는 광섬유가 감긴 층 전체를 하나의 튜브(tube)로 등가화하고, 광섬유의 등가 물성을 계산하였다. 단일 모드 광섬유는 직경이  $4 \times 10^{-6}$  m인 코어(core),  $125 \times 10^{-6}$  m인 클래딩(cladding),  $187 \times 10^{-6}$  m인 외부 폴리머 층으로 구성되어 있다<sup>15-6, 10-11</sup>. 광섬유의 코어 및 클래딩, 그리고 외부 폴리머 층의 재질로 각각 가장 많이 사용되는  $99\text{SiO}_2\text{-1GeO}_2$  및  $95\text{SiO}_2\text{-5B}_2\text{O}_3$ , PMMA로 가정하였고, 계산한 광섬유의 등가 물성을 표 1에 나타내

었다.

### IV. 음향 감지부의 형상 변수 및 재질 변수 설정

본 연구의 대상인 맨드릴형 센서는 그림 1에 나타난 바와 같이 탄성체인 맨드릴 과 광섬유, 그리고 외부 폴리머 몰딩 층으로 구성 되어 있고, 각각의 구성 부품들의 재질 및 형상이 외부 음압에 대한 반응 특성에 영향을 준다. 그리고 일정한 재질 및 형상을 갖는 10m의 광섬유를 사용하여 작동 주파수 범위가 10 kHz 이상인 맨드릴형 센서를 설계하기 위해서는 맨드릴과 몰딩 층의 형상 및 재질을 변경시켜야 한다.

먼저 맨드릴의 크기는 하이드로폰의 작동 주파수 범위 및 감긴 광섬유의 총 길이에 의하여 결정 된다. 그러나 맨드릴 하이드로폰의 최대 사용 주파수가 10 kHz 이므로 맨드릴 자체의 일차 공진 주파수가 10 kHz 이상 이어야 한다. 만약 테프론 재료로 반경 2cm이고, 길이 5.1cm인 맨드릴을 구성할 경우 1차 공진 주파수가 10 kHz 근방이므로 맨드릴의 최대 길이가 약 5cm 임을 알 수 있다. 또한 맨드릴의 최소 길이는 감긴 광섬유의 높이, 즉 광섬유의 총 길이에 의하여 결정되며 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$L_{min} = \frac{L_f \cdot D_f}{2 \cdot \pi \cdot (R_m + D_f/2)} \quad (9)$$

여기서  $L_{min}$ 은 맨드릴의 최소 길이,  $L_f$ 는 파이버의 총 길이,  $D_f$ 는 파이버의 직경, 그리고  $R_m$ 은 맨드릴의 반경을 의미한다.  $L_f$ 는 10m로 고정된 것으로 한다.

그리고 맨드릴의 직경에 따라 총 10m로 제한된 광섬유가 감기는 높이가 변화하므로 몰딩 재료는 광섬유 위에만 도포 된다고 가정하였다. 즉, 몰딩이 되는 길이는 맨드릴의 각 경우에 광섬유가 감기는 길이와 같도록 하고, 몰딩 두께를 최대 1.0mm 까지로 한정하였다.

이상의 결과로부터 10kHz까지의 작동 주파수 대역을 갖는 맨드릴 하이드로폰의 성능 연구를 위하여 변경할 수 있는 형상 변수의 범위는 다음과 같다.

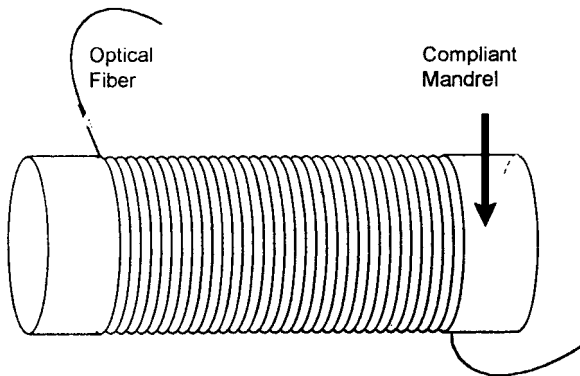


그림 1. 광섬유 맨드릴 하이드로폰의 구조  
Fig 1. Schematic structure of optical fiber-wound mandrel hydrophone

표 1 광섬유의 등가 물성

Table 1. Equivalent material properties of the optical fiber

	Material & Geometry	E( $10^9$ Pa )	density(kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio
Core	99SiO <sub>2</sub> - 1GeO <sub>2</sub> Dia = $4 \times 10^{-6}$ m	72.45	2202	0.17
Cladding	95SiO <sub>2</sub> - 5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Dia. = $125 \times 10^{-6}$ m	65.14	2187	0.149
Jacket(1)	Si - rubber Dia = $187 \times 10^{-6}$ m	0.0035	1050	0.4995
Jacket(2)	PMMA Dia. = $245 \times 10^{-6}$ m	6.24	1190	0.34
등가물성	Optical fiber	19.56	1404.4	0.3417

맨드렐의 길이 = 5.1 ~ 1.56cm  
 맨드렐의 반경 = 0.75 ~ 2.5cm  
 물딩 두께 = 0.1 ~ 1mm

유향 감지부의 재질 변수는 맨드렐 및 물딩 층의 탄성율, 체적 탄성율, 포아손 비, 그리고 밀도 등을 들 수 있다. 그러나 이들 중 탄성율, 체적 탄성율, 그리고 포아손 비들 간에는 서로 상관관계가 있기 때문에 실제 독립변수는 두가지 뿐이고 나머지 한개는 앞의 두 변수들로부터 구해낼 수 있다. 광음향 변환 하이드로폰에 가장 많이 사용되고 있는 맨드렐 재료로는 테프론, 나일론, 실리콘 고무, 자연 고무등이고, 물딩 재료로는 폴리에틸렌 과 폴리프로필렌, PVC, 고무등이 많이 사용된다<sup>11, 4-5, 12</sup>. 이들 재료의 탄성율은 0.1 GPa에서 6 GPa 정도의 범위를 가지고, 체적 탄성율의 경우 1 GPa에서 8 GPa 정도의 값을 가지고 있다. 또한 밀도 경우 이상의 모든 재료들이 1500 kg/m<sup>3</sup> 정도의 거의 일정한 값을 갖는다.

이상의 결과로부터 맨드렐형 센서의 성능 연구를 위하여 변경할 수 있는 맨드렐 및 물딩의 재질 변수는 다음과 같다.

탄성율 : 0.1 ~ 5Gpa  
 체적 탄성율 : 0.1 ~ 10Gpa  
 포아손 비 : 0.1 ~ 0.49

V. 유한 요소 모델링 및 수치 해석

광음향 변환 맨드렐 하이드로폰의 외부 음압에 대한 반응 특성을 해석하기 위한 유한 요소 모델은 음향 감지부와 음향 파의 전달 통로인 액체 매질의 묘사가 필요하다. 그리고 음향 감지부의 구조 혹은 재질, 그리고 외부 음압의 주파수 변화에 대한 특성 해석에 필요한 모델과 감도의 지향성 해석을 위하여 별도의 모델이 필요하다. 이 두 가지의 유한 요소 모델은 상용화된 프로그램인 ANSYS 5.0 A를 사용하여 구성 하였다.

유한 요소 모델 구성시 해석의 경제성을 고려하여 광섬유는 등가화된 튜브로 모델링하였고, 부구조(sub-structuring) 기법을 적용하여 해석하였다. 즉, 먼저 음향파의 전달 매질인 액체와 맨드렐 하이드로폰을 포함하여 전체적인 3차원 유한 요소 모델을 구성하여 1차 해석을 한 후 광섬유가 감긴 높이까지만 3차원 유한 요소 모델의 상세한 부모델을 구성하여 재해석하여 최종 해를 계산하였다.

맨드렐 하이드로폰의 구성 재질 및 형상 변화의 영향, 그리고 주파수 응답 특성 분석에 사용한 3차원 유한 요소 모델을 그림 2에 나타내었다. 유한 요소 모델링시 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링하였고, 맨드렐 하이드로폰을 전혀 구속되지 않은 자유로운 상태이다. 그리고 외부에서 인가되는 음원은 평면파라 가정 하였고, 음원과 반대되는 위치의 액체 매질은 경계면에서 전혀 반사가 일

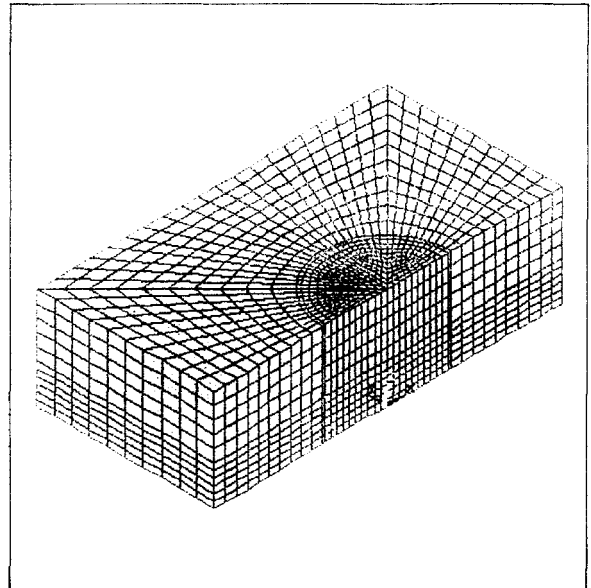


그림 2. 맨드렐 하이드로폰의 음향 감도 및 주파수 응답 특성 해석을 위한 유한 요소 모델  
 Fig. 2. Finite element model of the mandrel hydrophone for acoustic sensitivity and frequency response analysis

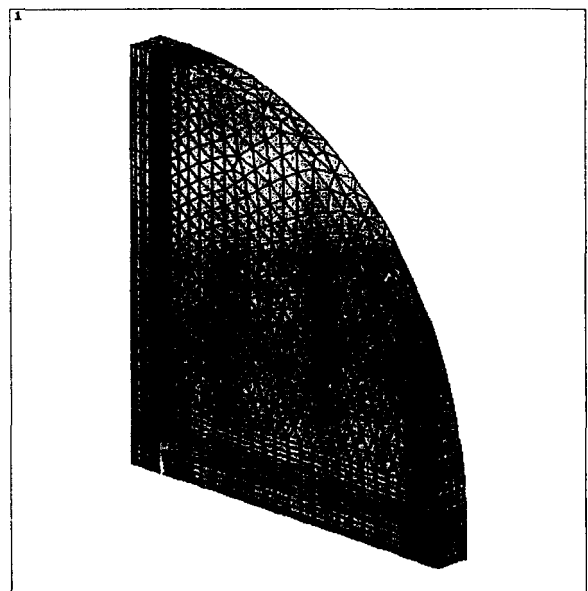


그림 3. 맨드렐 하이드로폰의 음향 감도의 지향성 해석을 위한 유한 요소 모델  
 Fig. 3. Finite element model of the mandrel hydrophone for directivity pattern analysis

어나지 않는 압력 해제 조건을 설정하였다. 그리고 1kHz의 외부 음압을 인가하고, 맨드렐의 재질 및 형상을 변화에 따른 맨드렐 하이드로폰의 음압 감도를 해석하였다. 또한 맨드렐 하이드로폰 감도의 지향성 해석을 위하여 그림 3과 같이 구형의 액체를 갖는 유한 요소 모델을 구성하였고, 맨드렐 하이드로폰은 대칭성을 고려하여 1/2만을 묘사하였다. 외부 음원은 5kHz의 점 음원이라고 가정하고, 음원이 존재하지 않는 액체의 경계면은 음파의 반사가 이루어지지 않도록 압력 해제 조건을 설정하여 맨드렐 하이드로폰의 지향성을 해석하였다.

VI. 결과 및 고찰

6.1 맨드렐부의 재질 및 형상 영향 분석

맨드렐 하이드로폰의 음향 감도에 영향을 주는 맨드렐

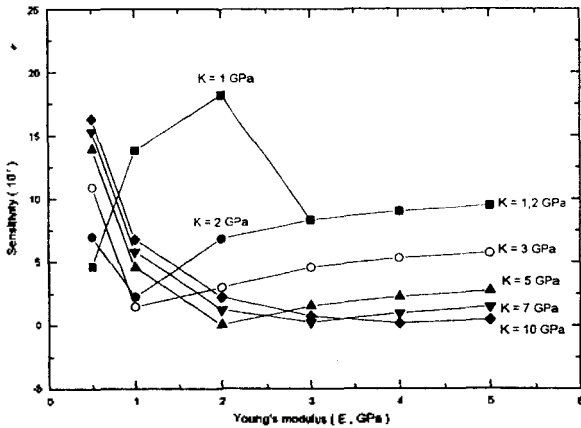


그림 4. 1kHz에서 맨드렐의 탄성율에 따른 광섬유 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화

Fig. 4. Acoustic sensitivities of the fiber-wound mandrel hydrophone with mandrel's elasticity at 1 kHz (mandrel lengths = 5cm, diameter = 3cm)

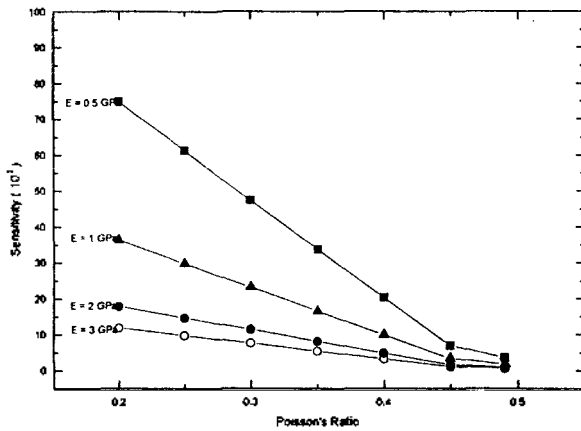


그림 5. 1kHz에서 맨드렐의 포아송 비에 따른 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화

Fig. 5. Acoustic sensitivities of the mandrel hydrophone with poisson's ratio of mandrel at 1 kHz (mandrel lengths = 5cm, Dia. = 2.5cm)

의 재질 변수는 체적 탄성율, 탄성율, 그리고 포아송 비등이다. 이들 재질 변수들이 맨드렐 하이드로폰의 광음향 감도 특성에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 그림 4부터 그림 5까지 나타내었다. 맨드렐 재질 변수의 영향만을 분석하기 위하여 맨드렐의 길이 및 직경은 각각 5cm와 3cm 크기로 고정하였다. 또한 광섬유의 길이는 10m로 고정하고, 테프론을 0.1mm 두께로 물딩 하었다고 가정하였다. 체적 탄성율을 값은 0.1 GPa부터 10 GPa까지, 탄성율의 경우 0.1 GPa부터 5 GPa까지, 그리고 포아송 비는 0.1부터 0.49까지 재질 변수를 변경하여 광음향 감도를 분석하였다.

맨드렐의 탄성율 변화에 따른 광음향 하이드로폰의 감도 변화를 그림 4에 나타낸 것이고, 그림 5는 맨드렐의 포아송 비에 따른 광음향 감도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 5 GPa 이상의 체적 탄성율을 갖는 맨드렐의 경우, 탄성율이 증가함에 따라 광음향 감도는 감소하다가 3 GPa 이상에서는 일정한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 체적 탄성율이 3 GPa 이하의 값을 가지며 탄성율이 3 GPa 이하의 범위인 경우, 탄성율이 증가함에 따라 광음향 감도가 증가후 감소하거나 혹은 감소후 증가하는 다소 향상되는 복잡한 경향성을 보여주고 있다. 또한 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 맨드렐 재료의 포아송 비가 증가함에 따라 광음향 감도가 감소하였고, 동일한 포아송 비를 갖는 경우 재료의 탄성율이 감소할 수록 높은 광음향 감도를 가지고 있다. 그러므로 그림 4의 체적 탄성율이 1 GPa, 2 GPa, 혹은 3 GPa인 맨드렐 재료의 탄성율 증가에 따라 복잡한 감도의 변화는 포아송 비가 서로 다르기 때문에 나타난 현상으로 설명할 수 있다. 즉, 포아송 비, 탄성율, 체적 탄성율의 세 가지 변수들 중에서 하이드로폰의 성능 대비 맨드렐의 물성간의 일관성 있는 상관관계를 나타낼 수 있는 것들은 포아송 비와 탄성율이고 체적 탄성율은 부속적인 값으로 보아야 할 것이다. 따라서 광음향 감도의 증진을 위해서는 체적 탄성율 및 탄성율, 그리고 포아송 비가 낮을 수록 바람직하다고 사료된다. 그러나 낮은 포아송 비를 갖기 위해서는 높은 탄성율과 낮은 체적 탄성율을 가져야 한다. 그러나 탄성율이 높아지면 광음향 감도가 감소하는 상반된 결과를 보이므로 낮은 포아송 비를 갖는 재질중 낮은 가장 탄성율을 갖는 재질을 선정하는 것이 바람직하다.

광섬유를 이용한 맨드렐형 하이드로폰의 감도에 영향을 주는 유연성 구조물인 맨드렐의 형상 변수인 맨드렐의 반경과 길이 변화에 따른 감도의 변화를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 맨드렐의 형상 변수의 영향을 고찰하기 위하여 탄성율과 체적 탄성율은 각각 2 GPa 및 1 GPa로 고정하였다.

그림 6에서 알 수 있듯이 맨드렐의 길이가 4 혹은 5cm인 경우 맨드렐의 반경 변화와 관계없이 거의 일정한 광음향 감도 특성을 보이고 있다. 그러나 맨드렐의 길이가 3cm인 경우, 오히려 맨드렐의 반경이 증가할수록 다소

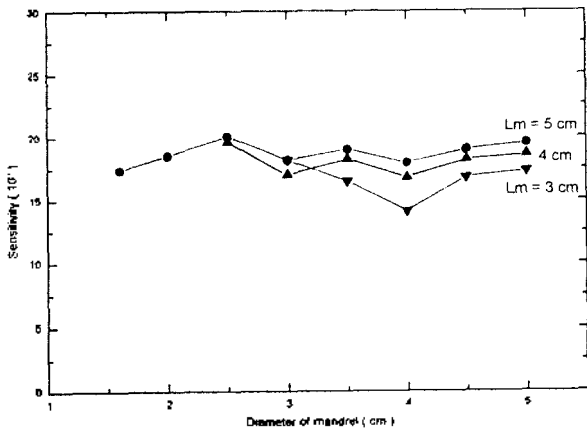


그림 6. 맨드렐의 직경에 따른 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화  
Fig 6. Acoustic sensitivities of the mandrel hydrophone with the mandrel diameters(Lm = mandrel length)

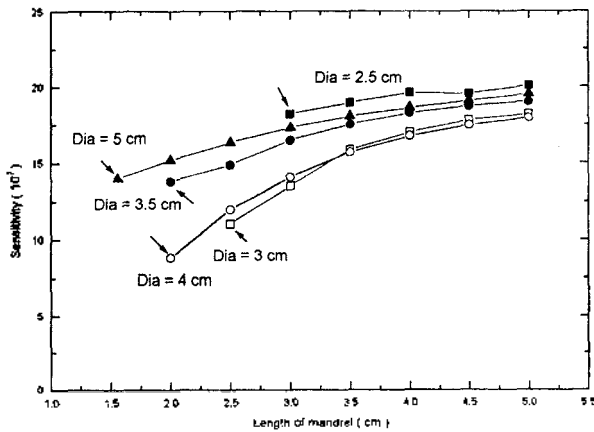


그림 7. 맨드렐의 길이에 따른 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화  
Fig 7. Acoustic sensitivities of the mandrel hydrophone with the mandrel length

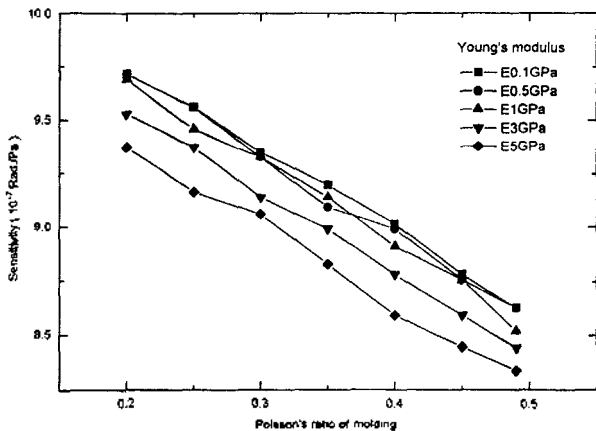


그림 8. 몰딩의 포아손 비에 따른 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화  
Fig 8. Acoustic sensitivity of the mandrel hydrophone with poisson's of molding

감소하다가 일정 반경 이상에서 다시 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그림 7은 맨드렐의 길이 변화에 따른 광음향 감도의 변화를 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 맨드렐의 길이가 증가함에 따라 광음향 감도도 증가하고, 길이가 계속 증가하게 되면 맨드렐의 반경과 상관 없이 일정한 값에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 그러므로 맨드렐형 광음향 하이드로폰의 감도 증진을 위해서는 반경을 변경하는 것보다 길이를 증가시키는 것이 효율적이다.

6.2 몰딩부의 재질 및 형상 영향 분석

몰딩 부의 재질 및 형상 변수가 광음향 감도에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 몰딩 재질의 포아손 비에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 9는 몰딩 두께에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이다. 이 경우 길이가 3.15cm, 직경이 2.5cm인 맨드렐의 탄성율 및 포아손 비가 각각 2 GPa 및 0.3인 경우에 대하여 광음향 감도를 분석하였다. 그리고 맨드렐 위에 몰딩되는 높이는 광섬유의 높이와 동일한 경우로 한정하였다.

그림 8에서 알 수 있듯이 몰딩 재료의 포아손 비가 낮을수록 그리고 탄성율도 낮을수록 높은 감도를 얻을 수 있다. 또한 몰딩 재료의 탄성율이 0.1 GPa와 1.0 GPa인 두 경우에 대해 몰딩 두께에 따른 감도의 변화를 나타낸 그림 9에 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 몰딩 두께가 늘어날수록 하이드로폰의 감도는 지속적으로 증가하였다. 그러나 몰딩이 아주 두꺼울 경우에도 감도가 계속 증가한다고 볼 수는 없지만, 실제로 적용 가능한 0.1-1.0mm의 두께에서는 광음향 감도가 증가하는 것으로 해석되었다. 이는 몰딩 재료가 유연할수록 외부 음압에 대해 큰 변형을 나타내고, 이것이 또 광섬유의 많은 변형을 유발하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 높은 감도를 위해서는 가능한 한 포아손 비는 낮고 탄성율도 낮은 재료를 몰딩 재료를 선택하고, 허용되는 범위내에서 가능한 한 몰딩을 두껍게 설치하여야 한다.

6.3 맨드렐형 하이드로폰의 주파수 응답 특성 및 지향성

맨드렐 및 몰딩의 재질과 형상 영향 분석을 근거로 하여 대표적인 구조의 광음향 하이드로폰에 대한 주파수 응답 특성 및 지향성을 평가하였다.

맨드렐 하이드로폰의 주파수 응답 특성을 분석의 경우 구성 재질 및 형상 영향을 분석할 때 사용한 유한 요소 모델과 동일한 모델을 사용하였고, 평면 음향파를 인가하여 500 Hz 간격으로 조화 해석을 행하였다. 맨드렐의 길이 및 직경은 각각 4cm 및 2.5cm로 고정하였다. 이렇게 한정된 이유는 1차 공진 주파수가 10 kHz 이상이며 동시에 감도가 좋은 형상이었기 때문이다. 그러나 엄밀한 의미에서 재료의 공진 주파수는 형상 및 재료 물성에 따라 크게 변한다. 그러므로 본 연구에서는 앞에서 계산한 여

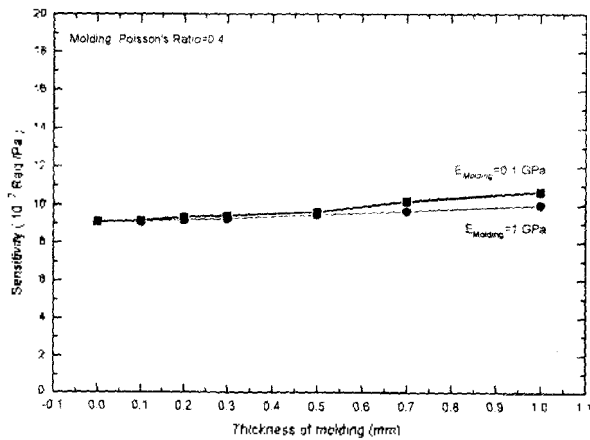


그림 9. 몰딩 두께에 따른 맨드렐 하이드로폰의 감도 변화  
 Fig 9. Acoustic sensitivity of the mandrel hydrophone with the molding thickness

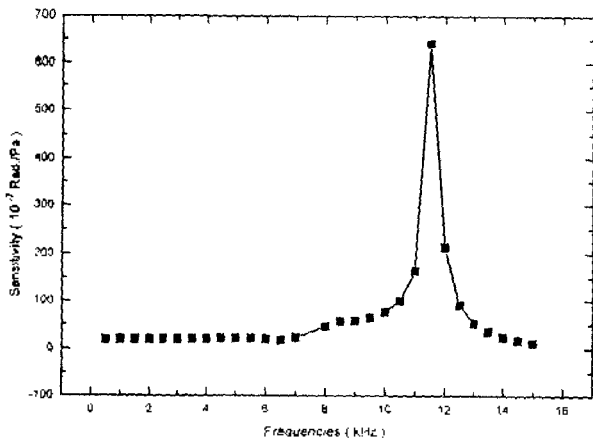


그림 10. 맨드렐 하이드로폰의 주파수 응답 특성  
 Fig 10. Frequency response characteristics of the mandrel hydrophone

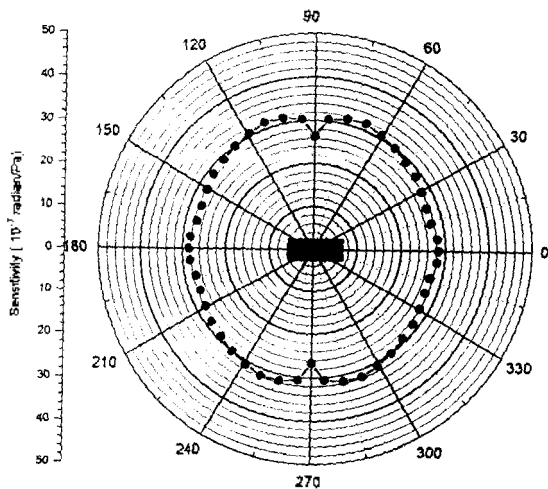


그림 11. 5kHz에서 맨드렐 하이드로폰의 감도 지향성  
 Fig 11. Directivity patterns of the mandrel hydrophone sensitivity at 5 kHz

러 경우들 중의 대표적인 예로서 맨드렐의 탄성을 및 포아손 비가 각각 2 GPa 및 0.3인 경우를 선정하였다.

광음향 감도의 주파수 응답 특성을 해석하고, 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 맨드렐 하이드로폰의 공진 주파수는 11.5 kHz 정도이고, 7 kHz까지는 20에서 23 rad./Pa 정도의 감도를 가지고 있으나 그 이상의 주파수에서는 불안정한 감도 특성을 보이고 있다. 즉 광음향 감도는 공진 주파수 주위에서 급격하게 변화한다. 10kHz에서도 저 주파수의 광음향 감도와 거의 동일한 특성을 갖는 맨드렐 하이드로폰을 설계하기 위하여서는 10 kHz보다 훨씬 높은 공진 주파수를 갖어야 한다. 그러나 공진 주파수는 단지 하이드로폰의 형상에 의해서만 결정되는 것이 아니라 구성 재료의 물성에 의해서도 동시에 영향을 받는다. 즉 재료의 일정한 밀도에 대해서 탄성율이 증가하면 공진 주파수 값도 증가하므로 높은 공진 주파수를 얻도록 형상을 조절해야 한다. 그러므로 맨드렐의 형상 변수들 중 길이의 변경 범위는 3.5cm 이하의 값을 가져야 한다.

그림 3의 유한 요소 모델을 사용하여 맨드렐 하이드로폰의 지향성을 평가하고, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 5 kHz의 점 음원(point source)을 인가하고, 맨드렐의 축 방향에서 시작하여 하이드로폰 주위로 일정한 간격으로 변화시키며 하이드로폰의 반응 특성을 해석하였다. 맨드렐 재료의 탄성을 및 포아손 비는 각각 1 GPa, 0.3 이었고, 직경과 길이는 각각 2.5cm, 3.5cm이었다. 그림 11에서 알 수 있듯이 맨드렐의 길이가 3.5cm인 경우 전 범위에서 광음향 감도가  $(30.2) \times 10^{-7}$  Rad./Pa의 감도 특성을 갖고 거의 완벽한 무지향성을 보이고 있다. 그리고 감도도 심하게 저하시키지 않는 범위 내에서 하이드로폰의 길이를 다소 작게할 경우 보다 완벽한 무지향성을 얻을 수 있을 것이다.

## Ⅶ. 결 론

본 연구의 최종 목표는 10m 길이의 광섬유를 사용해 작동 주파수 대역이 10 kHz까지 이고, 1mPa 대비 최소 -32dB 이상의 감도를 가지는 무지향성 광음향 변환 맨드렐형 하이드로폰의 최저 구조를 설계하는 것이다. 이러한 연구 목표를 달성하기 위하여 맨드렐 하이드로폰의 광음향 변환 특성을 규명하고, 사용 가능한 맨드렐 및 몰딩 용 재질을 분석하여 물성 및 형상 변수의 범위를 결정하였다. 그리고 맨드렐 하이드로폰의 유한 요소 모델을 구성하고, 맨드렐 및 몰딩의 재질과 형상이 광음향 감도 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 맨드렐 하이드로폰의 감도에 대한 주파수 응답 특성 및 지향성을 평가하였다. 이들 해석 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 맨드렐 재료의 탄성율과 포아손 비가 낮을수록, 맨드렐의 반경보다 길이가 증가할수록 감도가 향상된다.
- 2) 몰딩 재료의 탄성율과 포아손 비가 낮을수록, 두께가

증가할수록 감도가 향상된다.

- 3) 맨드릴 재료의 길이가 감소할수록 혹은 탄성율이 증가할수록 사용 주파수 영역이 증가하고, 10kHz 까지의 작동 주파수 대역을 확보하기 위해서는 하이드로폰의 첫번째 공진주파수는 10 kHz보다 월등히 높은 곳에 위치해야 한다. 또한 탄성을 1 GPa, 포아손 비 0.3인 길이 3.5cm, 반경 2.5cm인 맨드릴을 사용한 광섬유 하이드로폰은 5 kHz에서 302 Rad./Pa의 감도를 갖고 무지향성 특성을 가지고 있다.

상기의 결과를 이용해 유연성 구조물인 맨드릴형 광음향 하이드로폰을 제작할 경우 감도가  $30 \times 10^{-7}$  Rad./Pa에 이르고, 작동 주파수 대역이 10 kHz 까지이며 5 kHz 주파수에서 무지향성을 갖는 광음향 하이드로폰을 설계하였다.

## 참 고 문 헌

1. J. A. Bucaro, N. Lagakos, J. H. Cole, and T. G. Giallorenzi, "Fiber optic acoustic transduction," *Physical Acoustics* edited by R. H. Thurston, vol. 16, p. 385, 1982.
2. J. Jarzynski, R. Hughes, T. R. Hickman, J. A. Bucaro, "Frequency response of interferometric fiberoptic coil hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 69, No. 6, p. 1799, November 1981.
3. S. Africk, T. Burton, P. Jameson, and A. Ordubadi, "Design studies for fiber optic hydrophones," Report No. 4658, Bolt, Beranek & Newman, Inc., Cambridge, Mass, 1981.
4. N. Lagakos, E. U. Schnaus, J. H. Cole, J. Jarzynski, and J. A. Bucaro, "Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, No. 4, p. 683, April 1982.
5. R. Hughes and J. Jarzynski, "Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiberoptic hydrophones," *Applied Optics*, vol. 19, No. 1, p. 1, January 1980.
6. V. S. Sudarshanam and K. Srinivasan, "Static phase change in a fiber optic coil hydrophone," *Applied Optics*, vol. 29, No. 6, p. 855, February 1990.
7. J. F. Nye, "Physical Properties of Crystals," (Clarendon, Oxford Press, 1976).
8. G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Applied Optics*, vol. 18, No. 9, p. 1445, May 1979.
9. H. L. Price, "On the mechanism of transduction in optical fiber hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 66, No. 4, p. 976, October 1979.
10. J. A. Bucaro and T. R. Hickman, "Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection," *Applied Optics*, vol. 18, No. 6, p. 938, March 1979.
11. N. Lagakos, J. A. Bucaro, and R. Hughes, "Acoustic sensitivity predictions of single mode optical fibers using Brillouin scattering," *Applied Optics*, vol. 19, No. 21, p. 3666, November 1980.

12. D. W. Van Krcvelen, "Properties of Polymers," Elsevier Sci. Publish Co., Inc.

### ▲임 증 인(Jong-in Im)



1986년 2월: 한양대학교 무기재료과 (학사)

1989년 2월: KAIST 재료공학과(석사)

1989년~현재: RIST 기능세라믹팀 주  
임연구원

1991년~현재: 경북대학교 센서공학  
과 박사과정

※주관심 분야: 음향 및 광 센서 설

계, 유전 및 압전 재료 응용 및 개발

### ▲노 용 래(Yong-Rae Roh)

한국음향학회지 15권 5호 참조