

# 해석적 방법에 의한 맨드릴형 광-음향센서의 감도특성 분석

## Sensitivity Analysis of a Mandrel Type Fiber Optic Acoustic Sensor Using an Analytical Method

임종인\*, 노용래\*\*  
(Jong In Im\*, Yong Rae Roh\*\*)

### 요약

본 논문에서는 외부 음향신호에 대한 맨드릴형 광-음향센서의 반응특성을 이론적으로 해석하고, 재질변수 및 형상변수에 따른 음향감도를 해석적으로 분석하였다. 그리고 유한요소법으로 분석한 결과와 비교하여 해석적 분석결과와 타당성을 검증하였다. 그 결과, 대부분 일치하는 경향성을 보여주고 있으므로 해석적인 방법으로 대략적인 경향성 분석을 행하고, 필요한 영역에서 유한요소법을 이용하여 정밀한 해석을 하는 것이 광-음향센서의 최적구조를 설계하기 위한 경제적인 방법인 것으로 나타났다.

핵심용어: 맨드릴, 광섬유, 음향센서, 해석적 방법, FEM, 감도

### ABSTRACT

In this paper, theoretical acoustic sensitivity was derived to describe acousto-optic transduction property of the mandrel type fiber optic acoustic sensor with respect to external acoustic field. The acoustic sensitivity was analyzed in relation to both material properties and geometrical influence factors of the constitutional parts of the sensor, analytically. Validity of the theoretical results were verified through comparison with the finite element analysis results. The variation trends of the sensitivity of the sensor in relation to the studied parameters showed good agreement for the two analysis methods. According to the results, it is considered more economical to design the basic structure of the sensor with the analytic equations developed in this paper, and then to carry out further detailed analysis with the finite element method for specific points of design interest.

Key words: Mandrel, Optical, Optical fiber, Acoustic, Analytical method, FEM, Sensitivity

투고분야: 물리음향 및 광음향

### 1. 서론

맨드릴형 광-음향센서는 유연한 단성체인 맨드릴형 주위에 광섬유가 감겨져 있는 형태이고, 감지부의 기하학적 다양성 및 고감도 특성, 사용 주파수 대역조정의 용이성, 견고성, 고 신뢰성 등을 보유하고 있어 수중 음향센서로 가장 적합한 구조이다. 지금까지 연구는 플라스틱 재료 및 단순한 형상의 맨드릴형을 이용한 광-음향센서에 대하여 수행되어 왔고, 최근 광-음향센서의 전체 효율을 향상시키기 위한 고감도 음향센서 개발 및 사용 환경을 고려한 음향센서의 설계 필요성이 대두되고 있다<sup>1-6)</sup>.

고감도 광섬유 음향센서를 설계하기 위하여 해석적 방법 및 유한요소법(FEM)을 사용하여 외부 음향신호에 대한 센서의 반응특성을 분석하는 방법을 이용하고 있다<sup>2-11)</sup>. 해석적인 방법의 경우, 상대적인 분석결과와 정확성은 부

족하지만 단시간에 음향감도 특성의 경향성을 분석할 수 있다. 그러므로 센서의 영향인자에 따른 감도변화 경향성을 분석하기 위해서는 정확성이 향상된 해를 구하는 것이 필요하다. 반면 유한요소법을 이용하는 경우<sup>12-6)</sup>, 외부 환경변화를 고려하여 센서의 특성을 분석함으로써 음향감지부의 형상 및 재질을 최적화 할 수 있는 장점이 있으나 상대적으로 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 지금까지 보고된 해석적 방법으로 광-음향센서의 감도특성을 분석한 연구들은 단순한 광섬유를 사용한 직선형<sup>7-9)</sup> 및 코일형<sup>10)</sup> 광섬유 음향센서에 집중되어 왔고, Africk 등 몇몇 연구자<sup>2-4, 11)</sup>들에 의해 맨드릴형 광-음향센서에 관한 분석결과를 보고한 바 있다. 그러나 이들 맨드릴형 광-음향센서에 관한 연구는 광섬유층과 몰딩층을 무시하고, 단순한 원기둥형 맨드릴의 역학적 반응특성만을 분석하여 보고하고 있다. 그러므로 좀 더 정확성이 향상되고, 복합형상을 갖는 맨드릴형 광-음향센서의 감도특성을 분석하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 외부 음향신호에 대한 복합형상의 맨드릴형 광-음향센서의 반응특성을 이론적으로 해석하고, 형상변수 및 재질변수에 따른 감도변화에 대한 경향성을 분석하

\* 포항산업과학연구원 재료공정연구센터

\*\* 경북대학교 센서공학과 /전자전기공학부

접수일자: 1999년 3월 22일

였다. 또한 해석적 방법 및 유한요소법을 이용한 분석 결과를 비교하여 해석적인 분석방법의 타당성을 검증하고자 하였다.

## II. 광-음향센서 반응특성의 이론적 해석

### 2.1. 구조 모델링

맨드릴형 광-음향센서는 유연한 탄성체인 맨드릴 주위에 광섬유를 감고, 그 위에 몰딩(molding)층을 형성시키는 것이 일반적이다. 고감도 광-음향센서를 개발하기 위한 음향감지부의 기본 구조로 실린더 및 중공 층상복합체 실린더를 선정하였다. 길이가  $L$ 인 중공 실린더와 포밍(foaming)층으로 층상복합체를 형성한 중공 층상복합체 실린더 맨드릴(그림 1)을 이용한 광-음향센서의 단순화된 구조를 그림 2에 나타내었다.

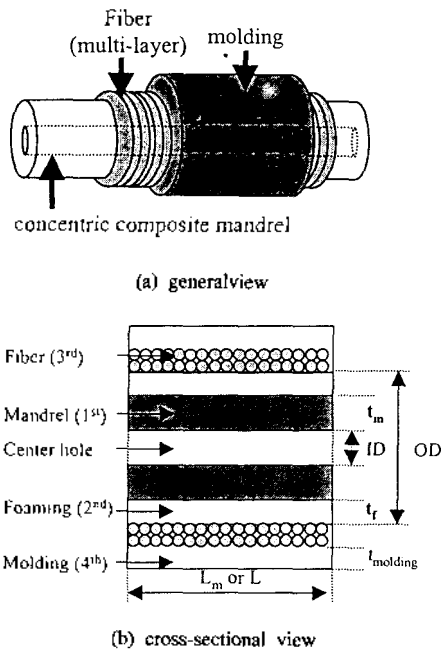


그림 1. 중공 층상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 구조  
Fig. 1. Schematic structure of the fiber optic acoustic sensor with a concentric composite mandrel.

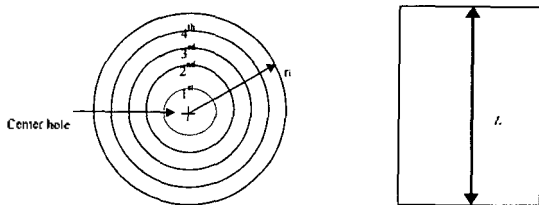


그림 2. 중공 층상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 단순화된 모델  
Fig. 2. Simplified model of the fiber optic acoustic sensor with the concentric composite mandrel (1<sup>st</sup> layer: the mandrel, 2<sup>nd</sup> layer: the foaming, 3<sup>rd</sup> layer: the optical fiber, 4<sup>th</sup> layer: the molding, L: length of the mandrel,  $r_i$ : radius of  $i^{\text{th}}$  layer,  $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ).

그림 2에 나타난 1<sup>st</sup>층은 중공원통형 맨드릴을 의미하고, 2<sup>nd</sup>층은 포밍층을, 3<sup>rd</sup>층은 광섬유 층을, 4<sup>th</sup>층은 몰딩층을 의미한다. 만약 중앙에 공간이 형성되지 않은 1<sup>st</sup>층, 1<sup>st</sup>층 및 2<sup>nd</sup>층의 재질이 동일하다고 가정하면, 그림 2는 실린더 맨드릴형 광-음향센서에 대한 단순 모델을 나타낸다고 볼 수 있다. 그리고 1<sup>st</sup>층의 재질과 2<sup>nd</sup>층의 재질이 다를 경우, 1<sup>st</sup>층/2<sup>nd</sup>층으로 구성된 중공 층상복합체 실린더 맨드릴형 광-음향센서를 나타낼 수 있다.

본 연구에서 1<sup>st</sup>층 및 2<sup>nd</sup>층은 각각 등방성 탄성체로 형성된다고 가정하였다. 코어, 클래딩 및 코팅층으로 구성된 광섬유(3<sup>rd</sup>층)는 맨드릴과 완전하게 결합되어 있고, 부피 비로 증가된 등방성 탄성체로 간주하였다<sup>[5-6]</sup>. 또한 1mm 두께인 폴리우레탄 재료를 몰딩층(4<sup>th</sup>층)으로 사용하고, 센서는 열적 평형상태이고 가정하였다. 그리고 평면파의 음향신호가 센서 표면에 입사하는 경우로 한정하고, 센서로부터 산란되는 음향신호는 무시하였다. 또한 센서의 작용하는 전체 음압은 입사된 음향신호의 압력과 동일하고, 중앙 기공은 진공 상태라고 가정하여 공기에 의한 효과는 무시하였다.

### 2.2. 이론적 해석

맨드릴형 음향센서에 외부 음향신호가 인가될 경우, 맨드릴이 반응하여 변형을 일으키게 되고, 광섬유에 변형이 전달되어 광섬유의 변형률에 비례한 광신호의 위상차가 발생하게 된다. 광-음향센서의 상대적인 감도를 나타내는 광파의 위상차는

$$\frac{\Delta \phi}{\phi} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{n^2}{2} [n_{11} * \sum \epsilon_r + n_{12} * (\sum \epsilon_\theta + \sum \epsilon_z)] \quad (1)$$

과 같이 나타내어 진다<sup>[1], [5-6]</sup>. 여기서  $\phi$ 는 광파의 위상을 의미하고,  $l, n, n_{ij}, \epsilon$ 는 각각 광섬유의 길이, 굴절율, 광탄성 상수 및 변형을 성분을 의미한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 맨드릴형 광-음향센서의 감도는 광섬유의 변형을 성분으로부터 계산되고, 광섬유의 변형을 성분은 센서 구성부분의 재질 및 형상과 밀접한 관계를 가지고 있다.

외부에서 입사되는 음향신호의 파장이 광-음향센서의 직경보다 훨씬 큰 경우인 저 주파수 영역에 대해서만 고려할 경우, 정수압이 광-음향센서에 작용하고, 맨드릴형 광-음향센서는 대략적으로 평면변형 상태에서 반응한다고 볼 수 있으므로 작은 변형에 대한 선형 탄성이론을 적용할 수 있다. 또한 광섬유는 맨드릴과 완전하게 결합되어 있다고 가정하였으므로 광섬유는 맨드릴의 원주방향의 변형과 동일한 축 방향의 변형을 갖는다. 그러므로 센서 내부의 응력 및 변형 성분들이 축대칭이고, 평면변형 상태에 대한 정역학적 탄성론을 사용하여 외부 음향신호에 의한 광섬유의 변형율을 계산할 수 있다. 그리고 맨드릴형 광-음향센서의 감도를 나타내는 식 (1)을 사용하여 음향감도를 해석적으로 구할 수 있다.

이차원적인 축대칭 응력분포를 갖고, 평면변형 상태로 존재하는 Z축으로 무한한 길이의 중공형 실린더에 대한

변형율-변위 관계를 나타내는 적합방정식은, 응력함수  $X$  및 극좌표를 사용할 경우,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\right) \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 X}{\partial \theta^2}\right) = 0 \quad (2)$$

과 같다<sup>7)</sup>. 경계조건을 적용하여 적합 방정식에 대한 편미분 방정식을 풀면, 이차원 문제의 해를 구할 수 있다. 일반적으로 응력함수는  $r$  및  $\theta$ 의 함수이지만, 축대칭 응력분포를 갖는 경우, 반경  $r$ 만의 함수로 표현되고, 응력함수의 일반 해는

$$X(r) = A \log r + B r^2 \log r + C r^2 + D \quad (3)$$

와 같다<sup>7)</sup>. 적분 상수  $A, B, C, D$ 는 경계조건으로부터 구하여야 한다. 그리고 반경방향의 응력 ( $\sigma_r$ ) 및 접선방향 응력 ( $\sigma_\theta$ )은 응력함수( $X$ )로부터 계산할 수 있다.

등방성 탄성재료의 변형율-응력 관계<sup>[12-15]</sup>로부터 중공 실린더에 대한 반경방향 및 접선방향의 변형을 성분은 각각

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} \left[ \frac{A}{r^2} (1 + \nu) + 2C(1 - \nu - 2\nu^2) \right] \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} \left[ -\frac{A}{r^2} (1 + \nu) + 2C(1 - \nu - 2\nu^2) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

과 같고, 평면변형 상태의 경우, 축방향 변형을 성분인  $\epsilon_z = 0$ 이다. 여기서  $E$ 는 탄성율을,  $\nu$ 는 포와송 비이다. 그리고 반경방향의 변위성분  $u$ 는 반경방향 변형을 성분을 적분하여 구할 수 있고,

$$u = \int \epsilon_r dr = r \epsilon_\theta = \frac{1}{E} \left[ -\frac{A}{r} (1 + \nu) + 2C(1 - \nu - \nu^2)r \right] \quad (5)$$

와 같이 나타내어 진다.

그림 2에 나타낸 맨드릴형 광-음향센서는 4개의 층으로 구성되어 있고, 각 층마다  $A$  및  $C$ 의 적분 상수를 구하여야 하므로 총 8개의 미지수가 존재한다. 따라서 광-음향 센서의 응력, 변형율, 변위의 해를 계산하기 위해 다음과 같은 8개의 경계조건이 필요하다.

- 센서 표면:  $\sigma_r =$  음향 신호의 압력 (1개 방정식).
- 센서 중앙:  $\sigma_r = 0$  (1개 방정식).
- 각 층의 경계:  $\sigma_r$ 은 연속 (3개 방정식).
- 각 층의 경계:  $u$ 는 연속 (3개 방정식).

이들 경계조건을 모두 적용하면, 각 층의 미지수인  $A$  및  $C$ 를 표현하는  $[Y]$ 와 계수인  $[Q]$ , 그리고 외부 음압을

표현하는  $[P]$ 로 구성되는 식 (6)의 행렬 방정식을 얻을 수 있다. 구하고자 하는 미지수 행렬인  $[Y]$ 는  $[Q]$ 의 역행렬을 구하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있다. 여기서  $[Y]$ 는  $8 \times 1$ 행렬로 나타내어지고,  $A$  및  $C$ 의 야렛침자 1, 2, 3, 4는 각각 그림 2의 음향센서를 구성하는 1<sup>st</sup>층, 2<sup>nd</sup>층, 3<sup>rd</sup>층, 4<sup>th</sup>층을 나타낸 것이다. 그리고  $[P]$ 는  $8 \times 1$ 행렬로 표현되고,  $[Q]$ 는  $8 \times 8$ 인 행렬로 구성된다.

$$[Q][Y] = [P] \quad (6)$$

$$[Y] = [Q]^{-1}[P] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } [Y] &= [A_1 \ C_1 \ A_2 \ C_2 \ A_3 \ C_3 \ A_4 \ C_4]^T \\ [P] &= [-P \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned}$$

이다.

평면변형 상태인 경계조건을 적용한 행렬 방정식을 풀면, 맨드릴형 광-음향센서의 광섬유 층에 대한 미지의 적분 상수인  $A_3$  및  $C_3$ 를 결정되고, 식 (4)로부터 광섬유의 변형율 성분을 계산할 수 있다. 이 결과를 식 (1)에 대입하여 센서의 음향감도를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 맨드릴형 광-음향센서의 상대적인 감도는

$$\begin{aligned} S_r &= \frac{\Delta \phi}{\phi} = \frac{1}{E_3} \left[ -\frac{A_3}{r^2} (1 + \nu_3) + 2C_3(1 - \nu_3 - 2\nu_3^2) \right] \\ &\dots - \frac{n^2}{2} \left[ \begin{aligned} &\pi_{11} \frac{1}{E_3} \left[ \frac{A_3}{r^2} (1 + \nu_3) + 2C_3(1 - \nu_3 - 2\nu_3^2) \right] \\ &\left( \frac{1}{E_3} \left[ \frac{A_3}{r^2} (1 + \nu_3) + 2C_3(1 - \nu_3 - 2\nu_3^2) \right] \right) \\ &+ \pi_{12} \left[ -\frac{A_3}{r^2} (1 + \nu_3) + 2C_3(1 - \nu_3 - 2\nu_3^2) \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

와 같다. 그리고 광-음향센서의 감도를 dB(기준감도:  $S_0 = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ )로 표시할 경우,

$$S = 20 \log \frac{S_r \phi}{S_0} \quad (9)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

맨드릴형 광-음향센서의 감도특성에서 알 수 있듯이, 광섬유의 변형율 성분을 구하면 음향감도를 계산할 수 있고, 광섬유의 변형율 성분은 설계인자, 즉, 구성부품의 재질 및 형상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 다시 말하면, 고감도 맨드릴형 광-음향센서를 설계하기 위해서는 구성 부품의 재질과 형상을 최적화하여 음향감도를 극대화할 수 있도록 광섬유의 변형율 성분을 유도하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 식(9)을 이용하여 구성부품의 재질, 형상 및 광섬유 변형율 성분사이의 상관관계를 분석하고, 음향감도의 향상 방안도출, 최적 재질선정 및 최적 구조를 설계하고자 하였다.

### III. 해석적 방법에 의한 광-음향센서의 감도특성 분석

#### 3.1. 실린더 맨드릴

앞의 유도한 이론적 음향감도 식 (9)를 사용하여 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 영향인자에 따른 음향 감도의 변화를 분석하고, 그 대표적인 해석결과를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 여기서 고려한 재질 변수는 맨드릴, 몰딩층의 탄성을 및 프와송 비이고, 형상변수는 맨드릴 외경 및 몰딩층의 두께이다.

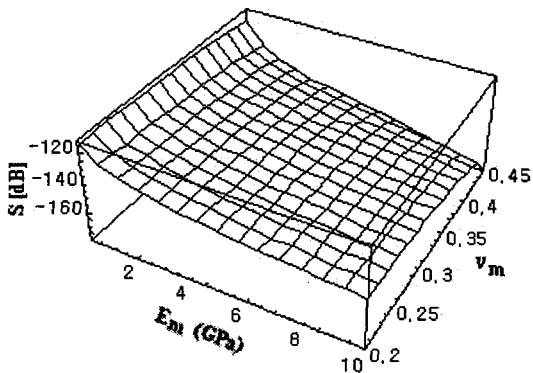


그림 3. 해석적 방법으로 분석한 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 3. Distribution of the sensitivity of the cylindrical mandrel type acoustic sensor without molding using the analytical method ( $L_m = 5\text{cm}$ ;  $D_m = 3\text{cm}$ ;  $D_m$ : diameter of the mandrel).

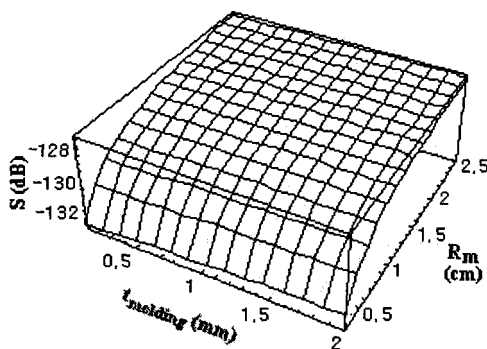


그림 4. 해석적 방법으로 분석한 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 4. Distribution of the sensitivity of the cylindrical mandrel type acoustic sensor using the analytical method ( $E_{\text{mandrel}} = 1\text{ GPa}$ ;  $\nu_{\text{mandrel}} = 0.3$ ;  $E_{\text{molding}} = 0.1\text{ GPa}$ ;  $\nu_{\text{molding}} = 0.4$ ).

맨드릴의 탄성을 및 프와송 비에 따른 음향감도의 변화를 그림 3에 나타내었고, 몰딩층의 두께와 맨드릴의 반경변화에 대한 음향감도의 변화를 그림 4에 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있듯이, 맨드릴 탄성율이 감소할수록, 프와송 비가 낮을수록 음향감도는 향상되는 경향성을 보

여주고 있다. 그리고 프와송 비가 0.4인 경우, 높은 탄성을 갖는 맨드릴에서 프와송 비가 증가에 따라 음향감도의 감소폭이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 맨드릴의 반경이 증가할수록 음향 감도가 증가하였고, 몰딩층의 두께가 2mm까지 증가함에 따라 음향감도는 계속 증가하는 것으로 분석되었다.

#### 3.2. 중공 층상복합체 실린더 맨드릴

이론적으로 유도한 음향감도 식 (9)를 사용하여 해석적인 방법으로 중공 층상복합체 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 감도특성을 해석하였다. (1)절의 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 분석결과, 제조 편리성을 고려하여 알루미늄 (Al), 나일론(nylon)을 맨드릴 재질로 선정하고, 포밍층과 층상복합체를 형성시킨 중공 층상복합체 실린더를 음향 감지부로 이용하고자 하였다. 광-음향센서는 광섬유, 맨드릴, 포밍층 및 몰딩층으로 구성된다. 광-음향센서의 감도 특성에 영향을 주는 형상변수로는 맨드릴의 내경, 외경, 길이, 두께 및 포밍층의 두께 등이다. 또한 재질변수로는 포밍층, 몰딩층의 탄성을 및 프와송 비 등을 고려하였다.

중공 층상복합체 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 영향인자에 따른 음향감도를 해석하고, 그 대표적인 해석결과를 그림 5부터 그림 8까지 나타내었다. 그림 5부터 그림 7까지의 해석결과는 중공 알루미늄 층상복합체 실린더에 대한 음향감도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 8은 중공 나일론 층상복합체 실린더에 대한 음향감도 특성의 변화를 나타낸 것이다.

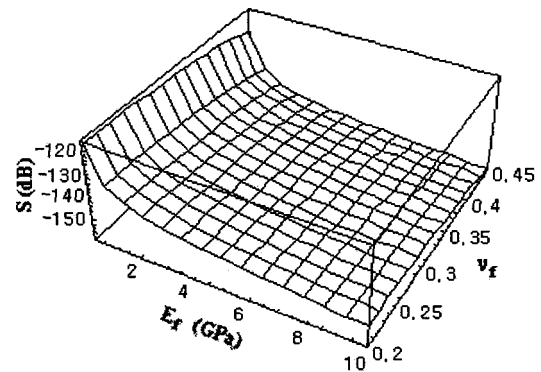


그림 5. 해석적 방법으로 분석한 중공 Al 층상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 5. Distribution of the sensitivity of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using the analytical method ( $ID = 4\text{cm}$ ;  $OD = 7\text{cm}$ ;  $t_{\text{foaming}} = 1\text{cm}$ ).

중공 알루미늄 층상복합체 실린더 맨드릴의 경우, 포밍층의 물성변화에 따른 음향감도의 변화를 해석하고, 그 대표적인 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 이 결과는 맨드릴의 외경 및 내경을 각각 7cm, 4cm로, 1cm 두께의 포밍층을 갖는 음향센서에 대하여 해석한 결과이다. 여기

에서 알 수 있듯이, 포밍층의 탄성율, 프와송 비가 낮을수록 음향감도는 향상되었고, 이 결과는 실린더 맨드럴의 물성이 음향감도 특성에 미치는 영향과 동일한 경향을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 포밍층의 프와송 비의 영향보다는 탄성율이 감도에 미치는 영향이 더 지배적임을 알 수 있다. 그림 6의 결과는 맨드럴의 내경과 포밍층의 두께에 따른 음향감도 변화를 나타낸 것이다(맨드럴의 외경: 7cm이고, 포밍층의 탄성율 및 프와송 비: 각각 1 GPa, 0.4인 경우). 여기에서 알 수 있듯이, 맨드럴의 내경 및 포밍층의 두께가 증가함에 따라 감도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 맨드럴의 내경, 포밍층의 두께가 음향감도의 증가에 미치는 영향은 모두 중요하지만 특히 포밍층의 두께가 미치는 영향이 아주 중요함을 알 수 있다.

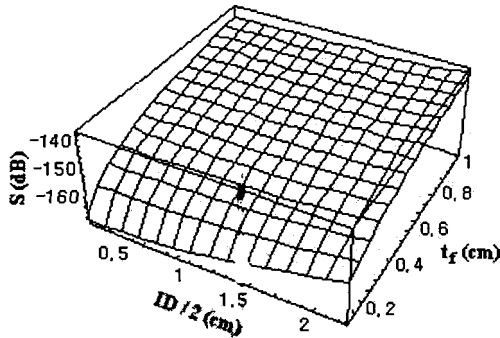


그림 6. 해석적 방법으로 분석한 중공 Al 층상복합체 맨드럴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 6. Distribution of the sensitivity of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using the analytical method (OD = 7cm;  $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ).

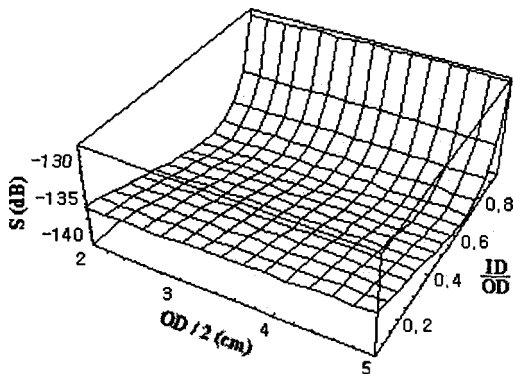


그림 7. 해석적 방법으로 분석한 중공 Al 층상복합체 맨드럴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 7. Distribution of the sensitivity of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using the analytical method ( $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ; thickness ratio of Al to the foaming = 1/1).

그림 7은 맨드럴의 외경 및 상대적인 내경/외경 비가 음향감도에 미치는 영향을 나타낸 것이다(포밍층 탄성율 및 프와송 비: 각각 1 GPa 및 0.4, 알루미늄 두께 / 포밍층 두께 = 1:1인 경우). 여기에서 알 수 있듯이, 맨드럴 외경은 음향감도에 거의 영향을 주지 않고, 내경/외경 상대비가 증가함에 따라 음향감도는 감소한다. 또한 일정 내경/외경 비 이상에서는, 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 급격하게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러므로 고감도 광-음향센서를 제조하기 위해서는 낮은 탄성율, 프와송 비를 갖는 재료로 두꺼운 포밍층을 형성시키고, 큰 내경 및 내경/외경 비를 갖는 중공 알루미늄 층상복합체 실린더 맨드럴을 이용하는 것이 바람직하다고 결론 내릴 수 있다.

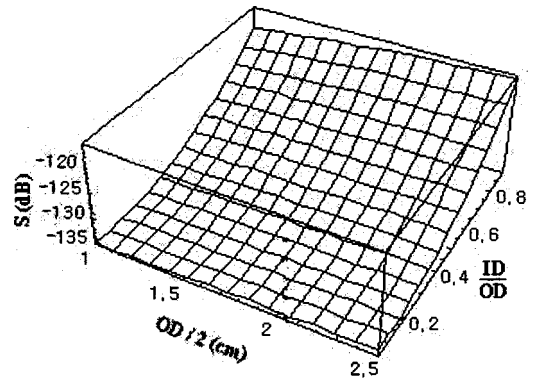


그림 8. 해석적 방법으로 분석한 중공 Nylon 층상복합체 맨드럴형 광-음향센서의 감도분포

Fig. 8. Distribution of the sensitivity of the fiber optic acoustic sensor with the nylon concentric composite mandrel using the analytical method ( $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ; thickness ratio of nylon to the foaming = 1/1).

중공 나일론 층상복합체 실린더를 음향감지부로 이용하는 경우, 포밍층의 탄성율, 프와송 비가 낮을수록 음향감도는 향상되었고, 앞의 결과와 동일한 경향을 갖는 것으로 분석되었다. 그리고 프와송 비가 감도에 미치는 영향보다는 탄성율이 감도에 미치는 영향이 더 지배적임을 알 수 있다. 그리고 맨드럴의 내경과 포밍층의 두께가 증가함에 따라 감도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 맨드럴의 내경 및 포밍층의 두께가 음향감도의 증가에 미치는 영향은 모두 중요하지만, 특히 맨드럴 내경의 영향이 약간 더 중요함을 알 수 있다. 그림 8은 맨드럴의 외경 및 내경/외경 비에 따른 음향감도의 변화를 나타낸 것이다. 이 대표적 결과로는, 포밍층의 탄성율과 프와송 비가 각각 1 GPa, 0.4이고, 나일론 및 포밍층의 두께 비가 1:1인 경우에 대하여 해석한 결과이다. 여기에서 알 수 있듯이, 맨드럴의 외경과 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 증가하고, 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 급속하게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이상의 결과로부터, 낮은 탄성율, 프와송 비를 갖는 재료로

두꺼운 포밍층을 형성시키고, 큰 내경 및 내경/외경 비를 갖는 중공 나일론 충상복합체 실린더 맨드릴을 이용하는 것이 바람직하다고 결론 내릴 수 있다.

해석적 방법으로 중공 충상복합체 실린더 맨드릴형 광-음향센서의 영향인자에 따른 음향감도 특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. 포밍층 탄성율과 프와송 비가 낮을수록, 맨드릴의 내경, 포밍층의 두께가 증가할수록 음향감도는 증가하였다. 중공 알루미늄 충상복합체 실린더 맨드릴의 경우, 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 감소하다가, 일정 비 이상의 영역에서, 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 급격하게 증가한다. 중공 나일론 충상복합체 실린더 맨드릴의 경우, 외경과 내경/외경 비가 증가함에 따라 음향감도는 증가하는 것으로 분석되었다.

IV. 해석적 방법 및 FEM에 의한 분석결과와의 비교

4.1. FEM에 의한 광-음향센서의 감도특성 분석

중공 알루미늄 충상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 감도 특성을 FEM으로 분석한 대표적인 결과<sup>[16-17]</sup>를 그림 9부터 그림 12까지 나타내었다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 포밍층의 탄성율이 증가함에 따라 음향감도는 급속하게 감소하고, 프와송 비가 증가함에 따라 음향감도는 다소 감소하는 경향성을 보이고 있다.

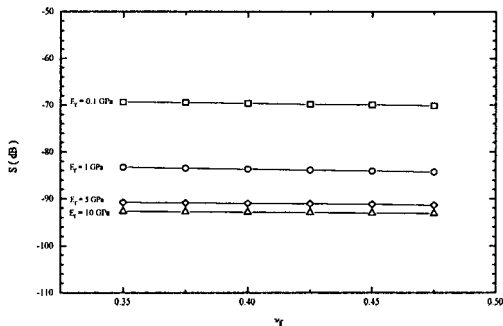


그림 9. FEM으로 분석한 중공 Al 충상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 foaming층의 물성에 따른 감도특성  
Fig. 9. Sensitivity vs. material properties of the foaming layer of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using FEM (ID = 4cm; Lm = OD = 7cm;  $f_{foaming} = 1$ cm).

또한 포밍층의 두께가 증가함에 따라 음향감도는 향상되고, 맨드릴의 내경이 증가함에 따라 거의 일정한 감도 특성을 유지하다가, 외경의 50%인 3.5cm 이상인 내경을 갖는 경우, 내경이 증가함에 따라 감도는 다소 향상되는 것으로 분석되었다 (그림 10). 동일한 내경을 갖고, 포밍층의 두께가 5mm, 10mm인 경우, 포밍층을 사용하지 않는 경우에 비해 각각 약 10dB 혹은 14dB 정도 음향감도가 향상되는 것으로 보아 제경보다 포밍층의 두께를 증가시키는 것이 음향감도 향상을 위해 효율적인 방법을 알 수 있다. 그리고 맨드릴의 외경 및 내경/외경 비가 증가함에

감도는 감소하고 (그림 11), 길이가 증가함에 따라 음향감도가 다소 향상되는 경향성을 보이고 있다 (그림 12).

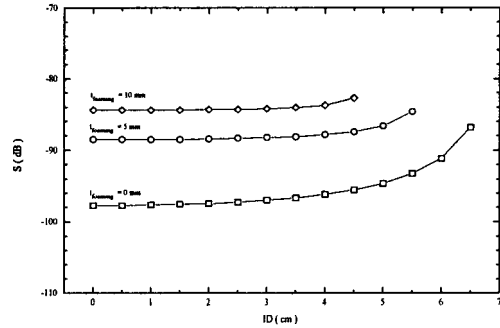


그림 10. FEM으로 분석한 중공 Al 충상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 내경에 따른 감도특성  
Fig. 10. Sensitivity vs. inner diameter (ID) of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using FEM ( $L_m = OD = 7$ cm;  $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ).

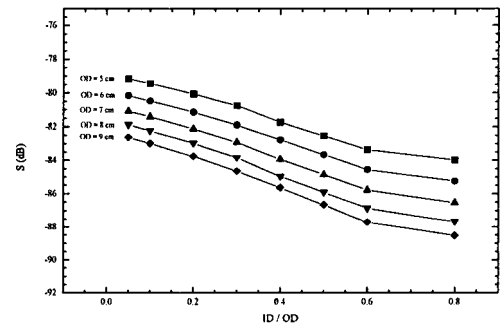


그림 11. FEM으로 분석한 중공 Al 충상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 내경/외경 비에 따른 감도특성  
Fig. 11. Sensitivity vs. ID/OD of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using FEM ( $L_m = 7$ cm;  $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ;  $t_m/t_f = 1/1$ ).

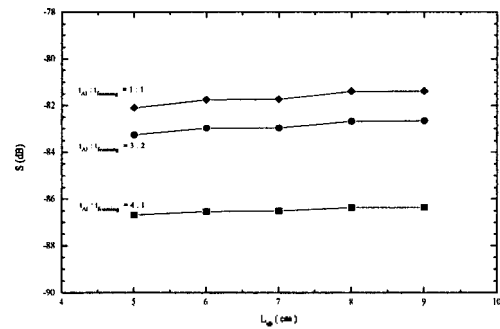


그림 12. FEM으로 분석한 중공 Al 충상복합체 맨드릴형 광-음향센서의 길이에 따른 감도특성  
Fig. 12. Sensitivity vs. length of the fiber optic acoustic sensor with the Al concentric composite mandrel using FEM (ID/OD = 0.4; OD = 5cm;  $E_{foaming} = 1$  GPa;  $\nu_{foaming} = 0.4$ ).

맨드릴형 광-음향센서의 영향인자, 즉, 구성부품의 재질변수 및 형상변수에 따른 음향감도 특성을 FEM으로 분석한 결과<sup>15-6, 16-17)</sup>를 요약하면 다음과 같다. 실린더 맨드릴의 경우, 맨드릴 탄성율과 프와송 비가 낮을수록, 길이가 증가할수록 감도가 향상된 것으로 분석되었다. 또한 맨드릴의 반경이 증가하는 무관하게 일정한 감도특성을 가진다. 그리고 몰딩층의 탄성율과 프와송 비가 낮을수록, 두께가 증가할수록 감도가 향상되는 것으로 분석되었다<sup>15-6)</sup>. 중공 알루미늄 및 나일론 층상복합체 실린더 맨드릴의 경우, 포딩 층의 탄성율과 프와송 비가 낮을수록, 두께가 증가할수록 음향감도는 증가하였다. 또한 맨드릴의 외경이 감소할수록, 길이가 증가할수록 감도가 향상되었다. 중공 알루미늄 층상복합체 실린더의 경우, 내경/외경 비가 낮을수록, 중공 나일론 층상복합체 실린더의 경우, 내경/외경 비가 높을수록 음향감도는 증가하는 것으로 분석되었다<sup>16-17)</sup>.

4.2. 해석적 방법 및 FEM에 의한 분석결과의 비교

맨드릴형 광-음향센서의 감도특성에 대한 해석적 방법 및 FEM으로 분석한 결과를 비교하여 표 1에 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이, 맨드릴 반경과 외경에 의한 영향을 제외하고, 구성부품의 영향인자에 따른 음향감도의 변화 경향은 대부분 일치하는 것으로 분석되었다. 다만 맨드릴 반경에 의한 감도변화 경향이 차이가 나는 원인은, 해석적인 방법의 경우, 맨드릴형 광-음향센서가 축대칭 유편분포를 갖는 경우로 가정하고, 구성부품의 영향인자에 따른 음향감도 변화 경향을 분석하였기 때문이다. 실제의 경우, 1kHz의 외부 음향신호를 인가하고, 3차원 정밀 해석을 수행한 FEM 분석 경우와 유사하게 광-음향센서 주위에 음압 구배가 존재하고, 광-음향센서는 비대칭 유편분포 및 변형특성을 갖는다.

표 1. 해석적 방법 및 FEM으로 분석한 설계변수에 따른 맨드릴형 광-음향센서의 감도변화 경향

Table 1. Variation trend of the sensitivity of the mandrel type fiber optic acoustic sensor in response to design factors from the analytical method and the finite element method (FEM), respectively.

(a) Cylindrical mandrel case

Influencing factors		Analytical method	FEM
Mandrel	Youngs modulus	the smaller, the higher S	the smaller, the higher S
	Poissons ratio	"	"
	Radius	the higher, the higher S	Constant S
	Length	-	the higher, the higher S
Molding layer	Youngs modulus	the smaller, the higher S	the smaller, the higher S
	Poissons ratio	"	"
	Thickness	the higher, the higher S	the higher, the higher S

(b) Concentric composite mandrel case

Influencing factors		Analytical method	FEM
Foaming layer	Youngs modulus	the smaller, the higher S	the smaller, the higher S
	Poissons ratio		
	Thickness	the higher, the higher S	the higher, the higher S
Aluminium mandrel	Inner diameter		
	Outer diameter	Constant S	
	Length	-	
Nylon mandrel	Inner diameter	the higher, the higher S	
	Outer diameter		Constant S
	Length	-	the higher, the higher S

또한 해석적인 방법의 경우, 평면 변형상태로 가정하여 맨드릴의 길이에 따른 음향감도의 변화를 고려할 수 없었다.

실린더 맨드릴 및 중공 층상복합체 실린더 맨드릴형 광-음향센서에 대한 두 방법의 분석 결과를 종합하여 볼 때, 재질에 대한 감도변화 경향은 서로 일치하고, 반경 혹은 외경영향을 제외한 형상에 대한 감도변화 경향은 서로 일치하고 있다. 또한 해석적 방법을 사용할 경우, FEM 분석에 비해 단기간에 경향 분석이 가능한 장점이 있다. 그러므로 일차적으로 해석적인 방법을 사용하여 대략적인 경향 분석을 행하고, 필요한 영역에서 FEM을 사용하여 정밀한 해석을 하는 것이 광-음향센서의 최적구조를 설계하기 위한 경제적인 방법이다.

IV. 결론

본 연구에서는 해석적인 방법으로 고감도 맨드릴형 광-음향센서의 설계하고자 하였다. 외부 음향신호에 대한 맨드릴형 광-음향센서의 반응특성을 분석하고, 이론 감도를 유도하여 재질변수와 형상변수에 따른 음향감도를 해석하였다. 또한 해석적 방법 및 FEM을 이용한 분석결과를 비교하여 해석적인 방법의 타당성을 검증하였다. 그 결과, 맨드릴형의 외경변화에 의한 감도변화 경향만이 다소 차이를 보이고 있으나 그 이외의 재질변수 및 형상변수에 의한 음향감도 변화 경향은 서로 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 그러므로 본 연구의 해석적인 방법으로 경향성을 분석하고, FEM을 사용하여 정밀한 해석을 하는 것이 맨드릴형 광섬유 음향센서의 최적구조를 설계하기 위한 경제적인 방법이다.

참고 문헌

1. J. A. Bucaro, N. Lagakos, J. H. Cole, and T. G. Giallorenzi, "Fiber Optic Acoustical Transduction" in *Physical Acoustics Vol. XVI*, Academic Press, Inc., pp. 385 - 475. 1982.

2. S. Africk, T. Burton, P. Jameson, and A. Ordubadi, "Design studies for fiber optic hydrophones", *Rep. No. 4658*, Bolt, Beranek and Newman, Inc., Cambridge Mass., 1981.
3. J. A. Bucaro, B. H. Houston, and E. G. Williams, "Fiber-optic air-backed hydrophone transduction mechanisms", *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(1), pp. 451 ~ 453, 1991.
4. G. F. McDearmon, "Theoretical analysis of a push-pull fiber-optic hydrophone", *IEEE J. of Lightwave Tech.*, **LT-5**(5), pp. 647 ~ 652, 1987.
5. J. Im and Y. Roh, "A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone", *J. of Acoust. Soc. Am.* **103**(5), Pt. 1, 2425 ~ 2431, 1998.
6. 임종인, 노용래, "FEM을 이용한 맨드릴형 광-음향 수중청음기의 설계에 관한 연구", *한국음향학회지* **16**(3), pp. 73 ~ 80, 1997.
7. B. Budiansky, D.C. Drucker, G.S. Kino and J.R. Rice, *Appl. Opt.* **18**, 4085-4088, 1979.
8. R. Hughes and J. Jarzynski, *Appl. Opt.* **19**, 98-107, 1980.
9. N. Lagakos and J. A. Bucarno, *Appl. Opt.* **20**, 2716-2720, 1981.
10. J. Jarzynski, R. Hughes, T.R. Hickman and J.A. Bucarno, *J. Acoust. Soc. Am.* **69**, 1799-1808, 1981.
11. G.W. McMahon and P.G. Cielo, "Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations", *Appl. Opt.* **18**(22), 3720-3722, 1979.
12. S. Timoshenko and J. N. Goodier, *Theory of elasticity*, McGraw-Hill, New York (1951)
13. A. E. H. Love, "Mathematical theory of elasticity", 4<sup>th</sup> edition., Cambridge Univ. Press, 1934.
14. H. Reissmann and P. S. Pawlik, "Elasticity: theory and applications", John Wiley and Sons, Ltd.
15. A. C. Ugural and S. K. Fenster, "Advanced strength and applied elasticity", 3<sup>rd</sup> edition., PTR Prentice Hall, Ltd.
16. 임종인, 노용래, "중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이브리드 폰의 최적 구조 설계; Part II. 맨드릴의 형상에 따른 광음향 감도 특성", *한국음향학회지* **17**(4), pp. 30 ~ 37, 1998.
17. 임종인, 노용래, "중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이브리드 폰의 최적 구조 설계; Part I. Forming층이 음파 전달 및 감도에 미치는 영향", *한국음향학회지* **17**(4), pp. 23 ~ 29, 1998.

1989년 1월~현재 : 포항산업과학연구원 재료공정연구센터  
 ※ 주관심분야: 센서 및 Actuator, MEMS, 전자재료 개발 및 응용

▲노용래(Yong Rae Roh)  
 한국음향학회지 제17권 제3호 참조

▲임종인(Jong In Im)



1982년 3월~1986년 2월 : 한양대학교 공과대학 무기재료 공학과(공학사)  
 1987년 3월~1989년 2월 : KAIST 재료공학과(공학석사)  
 1995년 3월~1999년 2월 : 경북대학교 전기전자공학부 센서공학과(공학박사)

1991년 : (미)Penn. State Univ. Material Research.(객원연구원)