

## 중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로폰의 최적 구조 설계 Part II. 맨드릴의 형상에 따른 광음향 감도 특성

### Structural optimizations of the optical fiber hydrophones with the hollow mandrel: Part II. The hydrophone's sensitivity with the mandrel's geometry

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

#### 요약

본 논문은 중공형 층상 복합체 맨드릴(mandrel)을 이용하여 기본 공진주파수가 15kHz 이상이고, 우수한 감도 특성을 지닌 광섬유 하이드로폰의 최적 구조를 설계하는 것에 관한 것이다. 유한요소법을 이용하여 AL/foaming 및 Nylon/foaming 층상 복합체의 공진주파수를 분석하여 설계 변수의 범위를 결정하였고, 맨드릴 형상에 따른 광음향 감도 특성을 분석하여 최적 구조를 결정하였다. 그 결과로 맨드릴의 외경이 감소할수록, 길이가 증가할수록 감도가 향상되었다. AL 맨드릴의 경우, 내경/외경 비가 낮을수록, Nylon 맨드릴의 경우 내경/외경 비가 높을수록 감도 증가를 위하여 효율적이다. 그리고 결정된 최적 구조의 AL/foaming 및 Nylon/foaming 맨드릴을 사용한 광섬유 하이드로폰의 감도는 각각 1 rad./Pa 대비 약 82 dB 및 85.7 dB 정도 이었고, AL 층상 복합체 보다는 Nylon 층상 복합체를 이용하는 것이 고 감도의 광섬유 하이드로폰을 제조하는데 유리함을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

This paper describes the structural optimization of an optical fiber hydrophone that has the fundamental resonant frequency over 15kHz and the superior pressure sensitivity under 200m deep underwater conditions. First, a modal analysis of the AL/foaming and Nylon/foaming mandrel is carried out and the performance of the hydrophone is analyzed with the Finite Element Method (FEM), the optimal structure of the mandrel is determined. The results show that the sensitivity is increased as the outer radius of the mandrel is decreased and the length is increased. Higher sensitivity is also achieved by decreasing the inner/outer radius ratio in the AL/foaming mandrel and increasing the inner/outer radius ratio in the Nylon/foaming mandrel. The sensitivity with the optimal structure of the mandrel is about 82 dB in the AL/foaming mandrel and is about 85.7 dB in the Nylon/foaming mandrel with respect to 1 radians/Pa, respectively. Finally, we conclude that the hydrophone with the Nylon/foaming mandrel has higher sensitivity than that with the AL/foaming mandrel.

#### I. 서론

본 논문에서는 중공형 층상 복합체 맨드릴(mandrel)을 이용하여 기본 공진주파수가 15 kHz 이상이고, 수심 200 m 환경에서 최대 광음향 우수한 감도 특성을 지닌 광섬유 하이드로폰의 최적 구조를 설계하고자 하였다. 본 논문의 "Part I. forming 층이 음파 전달 및 감도 특성에 미치는 영향[1]"에서 선정된 재질을 foaming을 사용한 AL/foaming 및 Nylon/foaming 층상 복합체를 음향 탐지부인 맨드릴

의 기본 재료로 선정하고, 유한 요소법으로 맨드릴의 형상 변화에 따른 공진 주파수 및 광섬유 하이드로폰의 반응 특성을 분석함으로써 중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로폰의 최적 구조를 설계하고자 하였다.

#### II. 중공형 광섬유 하이드로폰

본 연구의 대상인 중공형 광섬유 하이드로폰의 음향 감지부는 본 논문의 "Part I. forming 층이 음파 전달 특성 및 감도에 미치는 영향[1]"에 언급한 바와 같이 중공형의 구조물인 맨드릴 및 광섬유, 몰딩(molding) 층으로 구성되어 있다. 맨드릴의 기본 재료로 AL/forming 과

\* 포항산업과학연구원 기능세라믹팀,  
\*\* 경북대 전자공학과 / 센서공학과  
접수일자 : 1998년 2월 12일

Nylon/foaming 층상 복합체를 선정하였고, 150m 길이의 단일 모드 광 섬유를 사용하였다.

수중의 음향신호가 광섬유 하이드로폰에 입사될 경우, mandrel이 반응하여 변형을 일으키게 되고, 광섬유가 변형되어 광 신호의 위상차( $\Delta\phi$ )가 발생하게 된다. 광섬유 하이드로폰의 감도는 단위 음압이 인가될 때 광섬유에서 발생하는 광파의 위상차로 표시되고, 이를 측정함으로써 외부에서 인가된 음향신호를 분석할 수 있다.<sup>12,11</sup>

파장( $\lambda$ )이  $1.3\mu\text{m}$ 인 광파가 길이 1인 광섬유에 입사된다고 가정할 경우, 광섬유 하이드로폰의 감도(S)는 식(1)과 같이 나타낼 수 있고,  $1\mu\text{rad}/\mu\mu\text{Pa}$ 의 기준 감도에 대한 dB로 표시할 경우 식(2)와 같이 표시된다.<sup>11</sup>

$$S = \frac{\Delta\phi}{P_{\text{applied}}} = \phi^* \left[ \sum \epsilon_s + \sum \epsilon_s - \frac{\pi^2}{2} (P_{11}^* \sum \epsilon_s + P_{12}^* (\sum \epsilon_s + \sum \epsilon_s)) \right] \quad (1)$$

$$S(\text{dB}) = 20 \log \frac{S}{S_{\text{Ref}}} \quad \text{Ref. } S_{\text{Ref}} = 1 \mu\text{rad}/\mu\mu\text{Pa} \quad (2)$$

여기서  $P_{\text{applied}}$ 는 수중에서 하이드로 폰에 인가된 음압이고  $\epsilon_s$  및  $P_{ij}$ 는 각각 광섬유의 변형율과 광-탄성 상수를 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 단일 모드 광섬유의 광탄성 계수 및 굴절률은 각각  $P_{11} = 0.121$ ,  $P_{12} = 0.27$ ,  $n = 1.456$ 이다.<sup>16,17</sup>

### III. 유한요소법을 이용한 수치 해석

유한 요소법을 이용하여 AL/foaming 및 Nylon/foaming 층상 복합체인 맨드릴의 형상에 따른 공진 주파수를 분석하였고, 광섬유 하이드로폰의 감도 특성을 분석하였다. 상용화된 프로그램인 ANSYS 5.0 A를 사용하여 각각에 대한 유한 요소 모델을 구성하여 해석하였다.

맨드릴의 형상에 따른 광섬유 하이드로폰의 반응 특성을 해석하기 위하여 FEM을 이용한 맨드릴형 광-음향 수중 청음기의 설계에 관한 연구<sup>3</sup>에서 사용한 것과 동일한 유한 요소 모델을 구성하였다. 그리고 해석의 경제성을 고려하여 광섬유는 등가화된 튜브로 모델링 하였고, 수중 200m의 환경 조건인 20기압의 정수압을 인가하여 광섬유 하이드로폰의 변형을 해석하였다. 이 결과를 이용하여 광섬유 하이드로폰을 모델링하여 조화 해석한 후 상세한 부분 모델을 구성하여 재해석하여 외부 음압에 대한 광섬유 하이드로폰의 반응 특성을 계산하였다. 유한 요소 모델링시 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링 하였고, 맨드릴 하이드로폰은 전혀 구속되지 않은 자유로운 상태이다. 또한 외부에서 인가되는 음원은 평면파라 가정 하였고, 음원과 반대되는 위치의 액체 매질은 경계면에서 전혀 반사가 일어나지 않는 압력 해제 조건을 설정하였다. 그리고 1kHz의 외부 음압을 인가하고, 중공형 AL/foaming 및 Nylon/foaming 맨드릴의 형상 변화에 따른 광섬유 하이드

로폰의 감도 특성을 해석하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 4-1. 맨드릴의 공진 주파수 분석

음향 탐지부인 중공형 AL/foaming 및 Nylon/foaming 층상 복합체 맨드릴의 각각에 대한 공진주파수를 분석하고, 기본 공진 주파수가 15 kHz 이상인 광섬유 하이드로폰을 설계하기 위한 형상 변수의 범위를 설정하였다.

#### 4-1-1. AL/foaming 층상 복합체 맨드릴

중공형 AL 실린더 및 중공형 AL/foaming 층상 복합체인 맨드릴에 대한 기본 공진 주파수를 분석하고 그 결과를 그림 1부터 그림 4까지 나타내었다. 그림 1과 그림 2은 각각 AL 실린더의 외경 및 내경 증가에 따른 기본 공진 주파수의 변화를 나타낸 것이고, 그림 3은 중공형 AL 실린더의 내경 및 외경 증가에 따른 기본 공진 주파수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 1에 표시한  $L_m$ 은 맨드릴의 길이를 의미한다.

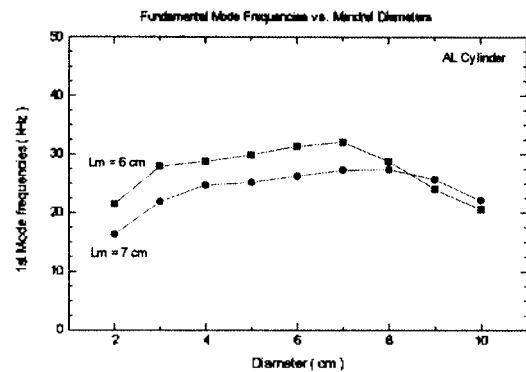


Fig. 1 Fundamental resonance frequency vs. diameter of the AL cylinder ( $L_m$ : lengths of the AL cylinder).

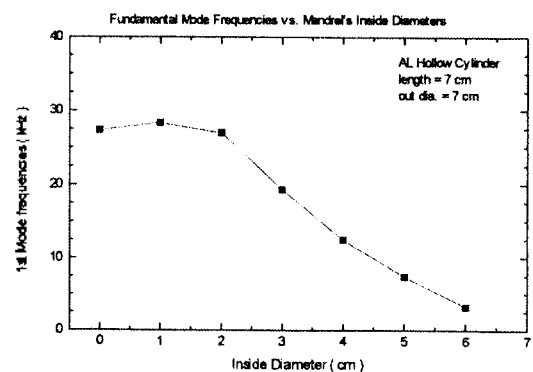


Fig. 2 Fundamental resonance frequency vs. inside diameter of the AL hollow cylinder.

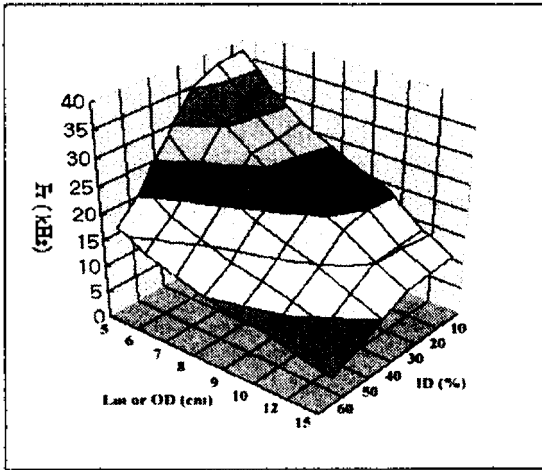


Fig.3 Variation of the resonance frequency with both Lm & Dm-in of the hollow AL mandrel which has the length equal to the outside diameter.

AL 길이가 증가함에 따라 기본 공진 주파수가 급격하게 감소하고, 10cm 이상의 경우 15kHz 미만의 기본 공진 주파수를 갖는다. 외부 직경이 증가함에 따라 기본 공진 주파수가 증가하다가 길이보다 직경이 더 클 경우 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 내부 직경이 증가함에 따라 기본 공진 주파수가 일정한 값을 갖다가 내경이 외경의 30% 이상의 범위에서 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 내경이 외경의 50% 이상의 범위에서는 15 kHz 미만의 기본 공진 주파수를 갖는다. 이 경우 길이는 외경과 동일하다고 가정하였다. 여기에서 알 수 있듯이 외경이 9cm, 내경이 외경의 35% 이상인 경우 혹은 외경이 10cm, 내경이 외경의 30% 이상인 경우 기본 공진 주파수가 15 kHz 미만임을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 중공형 AL 실린더 맨드릴의 경우 외경 및 길이가 9cm 이하이고, 내경도 외경의 50% 미만이어야 함을 알 수 있다.

이상의 결과에 의해 결정된 형상의 중공형 AL 층상 복합체 맨드릴을 이용한 하이드로폰의 모드 해석을 수행하

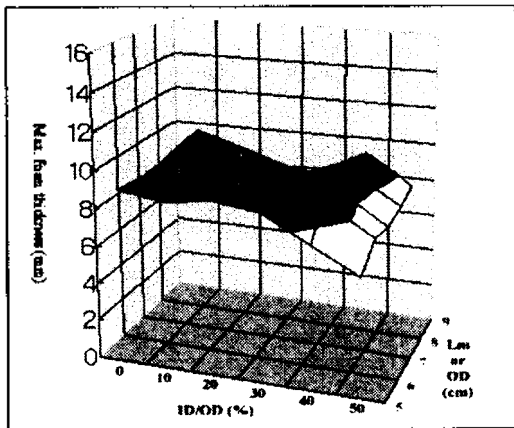


Fig.4 Maximum thickness of the foaming layer in the AL hydrophone having the resonance frequencies more than or equal to 15 kHz

고, 기본 공진 주파수가 15 kHz 이상이 되는 최대 foaming 층의 두께를 맨드릴의 외경 및 내경의 변화에 대하여 그림 4에 나타내었다. 여기서 광섬유는 두 층이 감겼다고 가정하였고, 두께가 1 mm이며 탄성률 0.1 Gpa, 포아손 비 0.4, 밀도 1500 kg/m<sup>3</sup>인 몰딩 층을 사용한 경우이다. 또한 foaming 층의 물성은 몰딩 층의 물성과 동일하다고 설정하고 계산한 결과이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 사용 가능한 foaming 층의 최대 두께는 대부분 8 ~ 10 mm 범위임을 알 수 있다.

4-1-2. Nylon/foaming 층상 복합체 맨드릴

Nylon 층상 복합체인 맨드릴에 대한 공진 주파수 분석을 하기 위하여 Nylon 실린더형 및 중공형 실린더, 중공형 Nylon 층상 복합체인 맨드릴을 이용한 하이드로폰의 각각에 대한 기본 공진 주파수를 분석하였고 그림 5는 Nylon 실린더의 외경 변화에 따른 기본 공진 주파수의 변화를 나타낸 것이다.

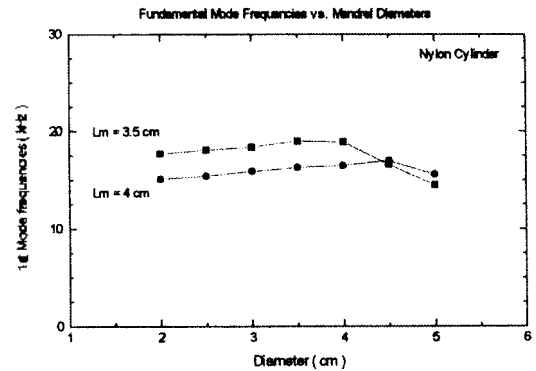


Fig 5 Fundamental resonance frequency vs. diameter of Nylon cylinder.

Nylon 실린더의 길이 증가에 따른 기본 공진 주파수가 급격하게 감소하고, 4 cm 이상의 경우 15 kHz 미만의 기본 공진 주파수를 갖는다. Nylon 실린더의 외경 증가함에 따라 기본 공진 주파수가 다소 증가하다가 길이보다 직경이 더 클 경우 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 내부 직경이 증가함에 따라 기본 공진 주파수가 일정한 값을 갖다가 내경이 외경의 25% 이상의 범위에서 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 내경이 외경의 25% 이상의 범위에서는 15 kHz 미만의 기본 공진 주파수를 갖는다. 이상의 결과로부터 중공형 Nylon 실린더 맨드릴의 경우 외경 및 길이가 4 cm 이하이고, 내경은 외경의 25% 이하, 즉 1 cm 이하이어야 한다.

그림 6은 중공형 Nylon 층상 복합체인 맨드릴을 이용한 하이드로폰의 기본 공진 주파수가 15 kHz 이상인 최대 foaming 층의 두께를 맨드릴의 외경 및 내경의 변화에 대해 나타낸 것이다. 여기서 광섬유는 2층이 감겼다고 가정하였고, 두께가 1mm, 탄성률이 0.1 Gpa, 포아손 비가 0.4,

밀도가 1500 kg/m<sup>3</sup>인 몰딩 층을 사용한 경우이다. 또한 foaming층의 물성은 몰딩 층과 동일한 경우에 대하여 계산한 결과이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 사용 가능한 foaming 층의 최대 두께는 대부분 4~6 mm 범위임을 알 수 있다.

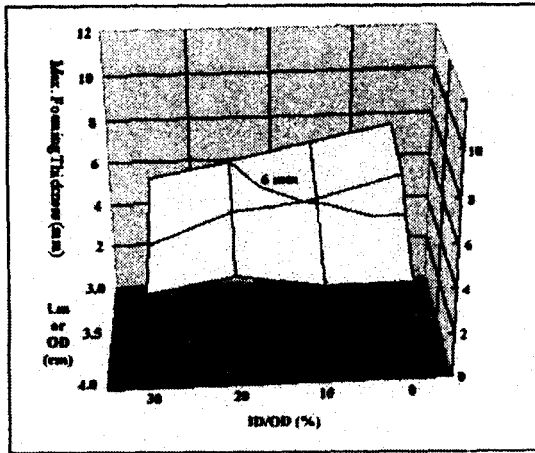


Fig.6 Maximum thickness of the foaming layer in the Nylon hydrophone having the resonance frequency more than or equal to 15 kHz.

4-2. 맨드릴 형상 변수의 범위

중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로폰은 중공형 AL 혹은 Nylon, foaming 층, 광섬유 층, 몰딩 층으로 구성되어 있다. 150 m 광섬유를 사용하고, 몰딩은 폴리우레탄을 사용하며 두께는 1mm로 고정하였다. 그리고 본 논문의 'Part I, foaming층이 음파의 전달 특성 및 감도에 미치는 영향'에서 분석한 결과와 같이 가능한 한 두꺼운 층을 사용하고, 1GPa 탄성율을 갖는 재질을 foaming 층으로 사용하였다.

광섬유 하이드로폰의 감도 특성에 영향을 주는 중공형 맨드릴의 형상 변수로는 내경과, 외경, 그리고 길이, foaming 층의 두께 등을 들 수 있다. 이들 형상 변수의 범위는 광섬유 하이드로폰의 기본 공진 주파수에서 이미 설정하였다. 중공형 맨드릴 광섬유 하이드로폰의 감도 특성에 영향을 주는 음향 감지부의 형상 변수 및 재질 변수 범위를 AL 과 Nylon 경우에 대해 각각 요약하여 다음과 같다.

1) AL / foaming 층상 복합체인 음향 탐지부

1GPa 이하의 탄성율 및 0~10 mm 정도 두께를 갖는 foaming 층을 사용하여 외경 및 길이가 5~9 cm 이고, 내경이 0~5 cm 정도인 음향 탐지부

2) Nylon / foaming 층상 복합체인 음향 탐지부

1GPa 이하의 탄성율 및 0~6 mm 정도 두께를 갖는 foaming 층을 사용하여 외경 및 길이가 2~5 cm 이고, 내경이 0~2 cm 정도인 음향 탐지부

4-3. 맨드릴의 형상에 따른 광섬유 하이드로폰의 감도 특성

음향 탐지부의 공진 주파수 분석에서 설정한 맨드릴의 형상에 따라 중공형 AL / foaming 및 Nylon / foaming 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로폰 각각에 대한 음압 감도 특성을 분석하고, 음향 탐지부의 최적 구조를 결정하였다. 음향 감도에 영향을 주는 형상 변수는 맨드릴의 내경, 외경, 길이 등이다.

4-3-1. AL/foaming 층상 복합체 맨드릴

중공형 AL 층상 복합체인 맨드릴의 내경과 외경, 길이 등 형상 변수에 따른 광음향 감도를 분석하고, 그 결과를 그림 7부터 그림 10까지 나타내었다. 그림 7과 그림 8은 각각 맨드릴의 내경 및 외경 변화에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 9는 맨드릴의 내경/외경 비의 변화에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이다. 그리고 맨드릴의 길이 변화에 따른 감도의 변화를 그림 10에 나타내었다. Mandrel의 형상 변수의 영향만을 고찰하기 위하여 foaming 층의 물성은 탄성율과 포아손 비를 각각 1 Gpa, 0.4로 고정하였고, 인가 되는 외부 음원의 주파수는 1 kHz 로 하였다.

맨드릴의 내경에 따른 광음향 감도 특성의 변화(그림 7)에서 알 수 있듯이 foaming 층을 사용하지 않는 AL 맨드릴 경우, 내경 증가에 따라 거의 일정한 감도 특성을 가진 후 외경의 50%인 3.5 cm 이상 영역에서 내경의 증가에 따라 감도가 다소 증가하였다. 그리고 내경이 0인 경우에 비해 외경의 약 85%인 6 cm 내경을 갖는 경우 감도가 약 9 dB 증가하였고, 그 이상 증가할 경우 감도가 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 foaming 층의 두께가 각각 5 mm, 10 mm인 경우 각각 AL 두께가 5 mm에 해당하는 내경인 5 cm, 4 cm 까지 내경이 증가함에 따라 감도의 변화가 없이 거의 일정한 값을 가지고 있었다. 그리고 동일한 내경에서 foaming 층을 사용하지 않는 경우에 비해 foaming 층의 두께가 각각 5 mm, 10 mm인 경우 각각 약 9 dB, 13 dB 증가를 보이는 것으로 보아 감도 특

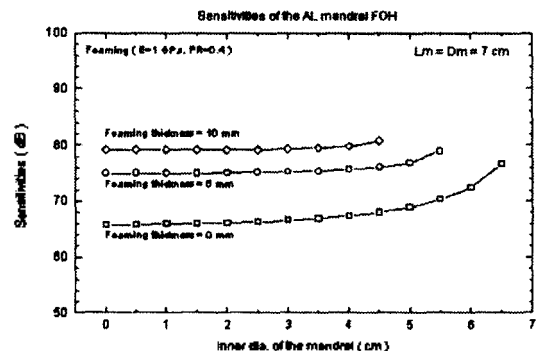


Fig.7 Hydrophone sensitivity vs. inner diameter (ID) of the AL mandrel.

성의 향상을 위해 내경의 증가보다 foaming 층의 두께의 증가가 훨씬 효율적이다.

그림 8은 AL 층상 복합체 맨드릴의 외경 변화에 따른 감도 특성의 변화를 나타낸 것으로 맨드릴의 길이 및 AI 층 / foaming 층의 두께비가 각각 7 cm, 5/5 이고, 내경/외경 비가 5%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% 인 경우에 대하여 맨드릴 외경을 변화시키 해석한 결과이다.

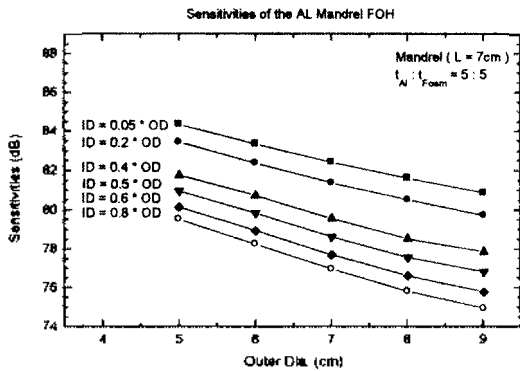


Fig.8 Hydrophone sensitivity with outer diameter (OD) of the AL mandrel (AI thickness : foaming layer thickness = 5 : 5).

그림 8에서 알 수 있듯이 맨드릴의 내경과 무관하게 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 감도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 foaming 층의 두께 및 AI층의 두께는 증가하고, 광섬유 층의 수는 감소한다. 즉, foaming 층의 두께 증가만을 고려할 경우 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 감도의 증가를 예상할 수 있으나 오히려 약간의 감도 감소 현상이 나타난다. 이 결과는 실린더형 맨드릴의 해석 결과와 일치하는 경향을 보여주고 있고, 특히 본 경우와 같이 광섬유보다 더 강성이 큰 AI을 맨드릴로 사용하는 경우, 맨드릴의 외경 증가에 따른 광음향 감도의 감소가 확연히 나타난다. 즉 외부 음압의 영향을 증폭시키는 것이 맨드릴의 주 기능이지만 AI의 강성이 광섬유보다 더 크기 때문에 오히려 음압에 의한 변형량을 더 축소 시키는 결과를 낳았기 때문으로 해석된다.

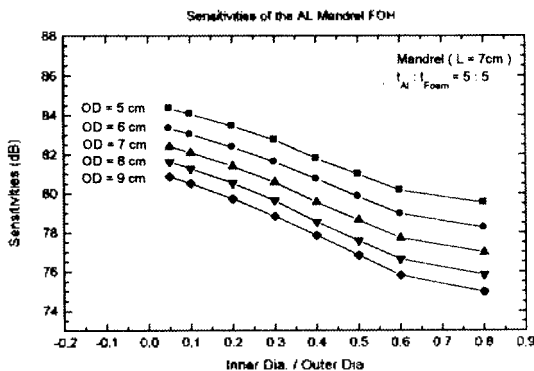


Fig.9 Hydrophone sensitivity with inner and outer diameter ratio of the AL mandrel (AI thickness : foaming layer thickness = 5 : 5).

또한 동일한 외경 및 AI 층 / foaming 층의 두께 비를 갖는 맨드릴의 경우, 맨드릴 내경의 증가에 따라 감도가 감소하는 현상은 foaming 층의 두께 감소에 의한 것이다.

그림 9의 결과는 그림 8의 결과를 맨드릴의 내경 / 외경 비의 변화에 대해 나타낸 것으로 맨드릴의 내경 / 외경 비 증가에 따라 감도가 감소하다가 내경 / 외경 비가 60% 이상에서는 다소 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 동일한 AI층 / foaming 층 비 및 외경을 갖는 맨드릴의 경우 내경/외경 비 증가에 따라 foaming 층의 두께 감소에 의해 감도 변화가 일어나고, 외경이 증가함에 따라 주위 음장의 변화로 감도의 변화가 발생한다.

그림 10은 AL 층상 복합체 맨드릴의 길이 변화에 따른 감도 특성의 변화를 나타낸 것이고, 맨드릴의 외경 및 내경이 각각 5 cm 및 외경의 40%인 경우, 그리고 AI 층 / foaming 층의 두께비가 8/2, 6/4, 5/5 경우 각각에 대하여 맨드릴 길이 변화에 따라 해석한 결과이다. 여기에서 알 수 있듯이 맨드릴의 길이가 증가함에 따라 감도가 0.5 dB 이내의 다소의 증가를 보여주고 있다. 이는 맨드릴의 길이 증가에 따라 맨드릴 위에 감기는 광섬유 층이 다소 감소하게 되고, 이에 의해 맨드릴의 유연성이 약간의 향상이 이루어져 나타난 결과로 감도의 증가가 이루어졌다고 해석된다.

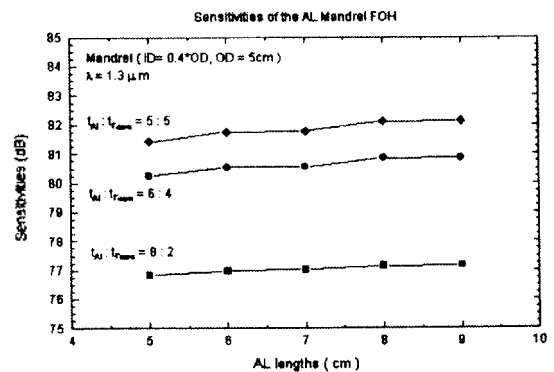


Fig.10 Hydrophone sensitivity with length of the AL mandrel. (ID = 0.4\*OD, OD = 5 cm)

이상의 결과를 종합하여 볼 때 동일한 내경/외경 비의 층상 복합체 AI 맨드릴의 경우, 외경이 작을수록, 그리고 동일한 외경의 경우, 내경/외경 비 및 AI층 / foaming 층 두께 비가 작을수록, 맨드릴의 길이가 길수록 높은 감도를 갖는 AI/foaming 맨드릴 하이드로폰을 구현할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 foaming 층 두께의 영향이 내경의 증가에 따른 영향보다 월등히 크므로, 가능한한 두꺼운 foaming 층을 사용하는데 우선을 두어야 할 것이다.

본 논문의 Part 1.의 "foaming 층이 음파 전달 특성 및 감도 특성에 미치는 영향(1)"의 결과 및 맨드릴의 공진 주파수 분석 결과, 맨드릴의 형상에 따른 감도 특성 분석 결과, 제조의 편리성 등을 종합하여 볼 때 기본 공진 주파수가

15 kHz 이상이고, 우수한 감도 특성을 가지는 광섬유 하이드로폰을 제조하기 위한 AL 층상 복합체인 맨드릴의 최적 재질 및 형상은 다음과 같다. 탄성율이 1 GPa 혹은 그 이하인 폴리머를 Foaming 층으로 사용하고, Al층/foaming 층의 두께 비가 5/5이며 5-6 cm의 외경 및 외경의 30~40%에 해당하는 내경, 그리고 7cm 정도 길이를 갖는 AL 층상 복합체 맨드릴을 사용하는 것이 바람직하다

4.3.2. Nylon/foaming 층상 복합체 맨드릴

층상 복합체인 nylon 맨드릴의 형상 변수들이 광음향 변환 감도 특성에 미치는 영향을 알아보고, 그 결과를 그림 11부터 그림 14까지 나타내었다. 그림 11과 그림 12는 각각 Nylon 맨드릴의 내경 및 외경 변화에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 13은 맨드릴의 내경/외경 비의 변화에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이다. 또한 맨드릴 길이 변화에 따른 감도의 변화는 그림 14에 나타내었다. 맨드릴 형상 변수의 영향을 고찰하기 위하여 foaming 층의 물성은 탄성율과 포아손 비를 각각 1 Gpa, 0.4로 고정하였고, 인가 되는 외부 음원의 주파수는 1 kHz로 하였다.

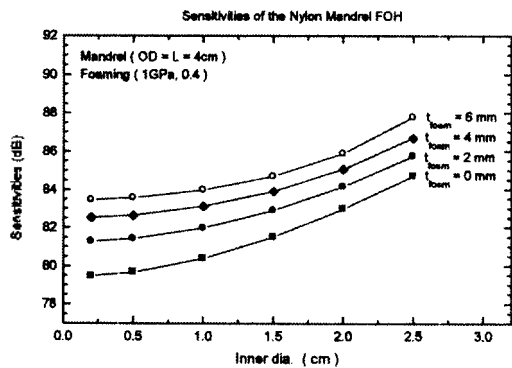


Fig. 11 Hydrophone sensitivity vs. inner diameter (ID) of the Nylon mandrel.

Nylon 맨드릴의 내경 변화에 따른 광음향 감도 특성의 변화(그림 11)에서 알 수 있듯이 foaming 층을 사용하지 않는 경우 및 사용한 경우 모두, nylon 맨드릴의 내경이 증가함에 따라 광음향 감도가 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 동일한 내경을 갖는 경우 foaming 층이 두꺼워 질수록 높은 감도 특성을 가지고 있다.

그림 12는, 길이가 4cm이며 nylon 층 / foaming 층의 두께비가 5/5 인 맨드릴이 외경의 40%, 50%, 60%에 해당하는 내경을 갖는 경우에 대하여, nylon 층상 복합체 맨드릴의 외경 변화에 따른 감도 특성의 변화를 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 감도가 감소하는 경향을 보이고 있고 이 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. Nylon 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 foaming 층의 두께 및 nylon 층의 두께는 증가하여 총

맨드릴의 두께도 증가하게 되고, 광섬유 층의 수는 감소한다. 즉, foaming 층의 두께 증가 및 광섬유 층의 감소에 의해 감도가 향상될 것이므로 맨드릴의 외경이 증가함에 따라 감도의 증가를 예상할 수 있다. 그러나 외경의 증가에 따른 직경 방향의 진동 모드와 기존 길이 방향의 진동 모드 간의 결합이 증가하여 약 1dB 이내의 감도 감소가 일어난 것으로 해석된다. 그리고 내경이 증가함에 따라 외경 증가에 따른 감도의 감소 폭은 더욱 적어져 맨드릴의 외경 증가에 따라 약 0.5 dB 이내로 거의 일정한 감도 특성을 보이고 있다고 해석할 수 있다.

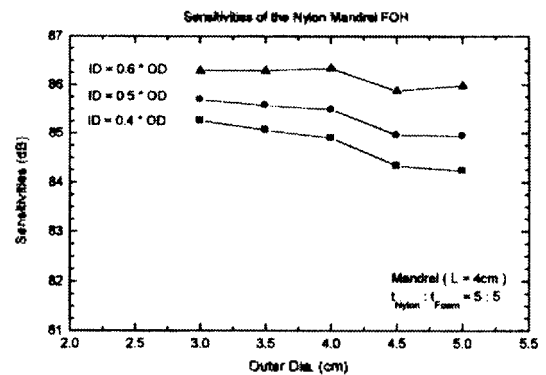


Fig. 12 Hydrophone sensitivity with outer diameter (OD) of the Nylon mandrel (Nylon thickness : foaming layer thickness = 5 : 5).

그림 13의 결과는 그림 12의 결과를 맨드릴의 내경 / 외경 비의 변화에 대해 나타낸 것으로, 맨드릴의 내경 / 외경 비 증가에 따라 감도 역시 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 동일한 nylon 층 / foaming 층 비 및 외경을 갖는 맨드릴의 경우 내경/외경 비 증가에 따라 foaming 층 및 nylon 층의 두께가 감소하여 맨드릴의 총 두께가 감소하기 때문에 감도가 증가하며, 외경이 증가함에 따라 nylon 및 foaming 층 두께의 증가로 맨드릴의 두께가 증가하여 감도가 감소한 것으로 해석된다.

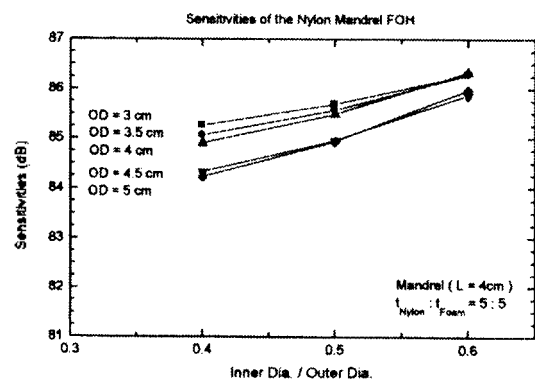


Fig. 13 Hydrophone sensitivity with inner and outer diameter ratio of the Nylon mandrel (Nylon thickness : foaming layer thickness = 5 : 5).

그림 14는 nylon 층상 복합체 맨드럴의 길이 변화에 따른 감도 특성의 변화를 나타낸 것이고, 3 cm의 외경 및 외경의 50%에 해당하는 내경을 갖는 맨드럴의 nylon 층 / foaming 층의 두께비가 8/2, 6/4, 5/5 인 각각의 경우에 대하여 맨드럴의 길이 변화에 따른 감도를 분석한 결과이다. 여기에서 알 수 있듯이 맨드럴의 길이가 증가함에 따라 2 dB 정도의 감도 증가를 나타내고 있다. 이는 맨드럴의 길이 증가에 따라 맨드럴 위에 감기는 광섬유 층이 감소하게 되고, 상대적으로 맨드럴의 유연성이 향상되어 감도의 증가가 이루어졌다고 해석된다.

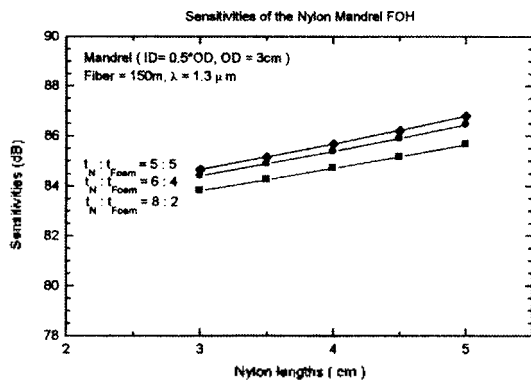


Fig. 14 Hydrophone sensitivity with length of the Nylon mandrel (ID = 0.5\*OD, OD = 3 cm).

이상의 결과로부터 동일한 내경/외경 비의 층상 복합체 nylon 맨드럴의 경우, 외경이 작을수록, 그리고 동일한 외경의 경우, 내경/외경 비가 클수록, Nylon층 / foaming 층 두께비가 작을수록, 길이가 길수록 광섬유 하이드로폰의 감도는 향상된다. 단, AL 층상 복합체인 맨드럴 경우에는 다르게 foaming층의 두께에 의한 영향보다는 내경의 증가에 따른 영향이 더 크므로, 가능한 한 큰 내경을 사용하는 데 우선을 두어야 할 것이다.

본 논문의 Part I.의 "foaming층이 음파 전달 특성 및 감도 특성에 미치는 영향"의 결과 및 맨드럴의 공진 주파수 분석 결과, 맨드럴의 형상에 따른 감도 특성 분석 결과, 제조의 편리성 등을 종합하여 볼 때 기본 공진 주파수가 15kHz 이상이고, 우수한 감도 특성을 가지는 광섬유 하이드로폰을 제조하기 위한 Nylon 층상 복합체인 맨드럴의 최적 재질 및 형상은 다음과 같다. 탄성율이 1GPa 혹은 그 이하를 갖는 Foaming 층을 사용하고, Nylon층/foaming 층의 두께 비가 5/5이며 3 cm의 외경 및 외경의 60%에 해당하는 내경, 그리고 5 cm 정도 길이를 갖는 Nylon 층상 복합체 맨드럴을 사용하는 것이 바람직하다고 결론 내릴 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 중공형 층상 복합체 맨드럴 및 150m 길

이의 광섬유를 사용하여 기본 공진 주파수가 15kHz 이상이고, 수심 200m의 환경에서도 우수한 감도 특성을 지닌 광섬유 하이드로폰의 최적 구조를 설계하고자 하였다. 이러한 연구 목표를 달성하기 위하여 유한요소법으로 AL/foaming 및 Nylon/foaming 층상 복합체의 공진주파수를 분석하여 맨드럴 형상의 범위를 결정하였고, 맨드럴 형상에 따른 광음향 감도 특성을 분석하였다. 분석 결과, 음향 탐지부인 맨드럴의 외경이 감소할수록, 길이가 증가할수록 감도가 향상되었다. AL 층상 복합체인 맨드럴의 경우, 내경/외경 비가 낮을수록, Nylon 층상 복합체인 맨드럴의 경우, 내경/외경 비가 높을수록 감도 증가를 위하여 효율적이다. 그리고 층상 복합체인 맨드럴의 공진 주파수에 대한 분석 결과, 음향 탐지부의 형상 변화에 따른 감도 특성 분석 결과, 제조의 편리성 등을 고려하여 맨드럴의 최적 구조를 결정하였고, 이들 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) AL 층상 복합체 맨드럴의 최적 구조 : 외경 = 5 - 6 cm, 내경 = 외경의 30~40%, 길이 = 7cm 정도, AL층 /foaming 층의 두께 비 = 5/5

1) Nylon 층상 복합체 맨드럴의 최적 구조 : 외경 = 3 cm, 내경 = 외경의 50%, 길이 = 4cm 정도, AL층 /foaming 층의 두께 비 = 5/5

그리고 결정된 최적 구조에 해당하는 AL/foaming 및 Nylon/foaming 맨드럴을 사용하여 광섬유 하이드로폰을 제조할 경우, 광음향 감도는 각각 약 82 dB 및 85.7 dB 정도로 계산되었고, AL 층상 복합체 보다는 Nylon 층상 복합체를 이용하는 것이 고 감도의 광섬유 하이드로폰을 제조하기에 유리하다고 최종 결론 내릴 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Jongin Im and Yongrae Rho, "Structural optimizations of the optical fiber hydrophones with the hollow mandrel: Part I. Effects of the foaming layer on the wave propagation and the sensitivity," J. of Acoustic Soc. of Korea, 1998. (to be submitted)
2. 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.
3. Jongin Im and Yongrae Rho, "Design studies for mandrel type fiber-optic hydrophones with FEM," J. of Acoustic Soc. of Korea, vol. 16, No. 3, p. 73, 1997
4. R. Hughes and J. Jarzynski, "Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiberoptic hydrophones," Applied Optics, vol. 19, No. 1, p. 1, January 1980.
5. 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.

6. 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
7. 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.

▲임 종 인 (Jong-in Im)



1986년 2월:한양대학교 무기재료과  
(학사)

1989년 2월:KAIST 재료공학과(석사)

1995년~현재:경북대학교 센서공학과  
박사과정

1989년~현재:RIST 기능세라믹팀 선  
임연구원

1991년 2월~8월:(미) Penn. State Univ., 객원연구원

\*주관심분야:음향 및 광 센서, 유전 및 압전 재료 응용  
및 개발

▲노 용 래

한국음향학회지 15권 5호 참조