8

주위 환경이 맨드릴형 광-음향센서의 감도특성에 미치는 영향

Influence of Environmental Conditions on the Sensitivity of a Mandrel Type Fiber Optic Acoustic Sensor

> 임 종 인*, 노 용 래** (Jong In Im*, Yong Rae Roh**)

요약

본 논문은 주위 환경인 수압 및 수온변화에 따른 맨드릴형 광음향센서의 감도특성을 분석한 것에 관한 것이다. 음향감지부 의 구조로는 실린더형, 중공 충상복합체형 및 air cavity가 삽입된 중공 충상복합체를 선정하고, 주위 수압과 수온변화에 따른 광·음향센서의 감도특성을 분석하였다. 맨드릴형 광·음향센서는 주위 정수압의 변화에 대해 0.15dB 미만의 음향감도 변화 를 나타내고, 수압변화에 대해 안정적인 특성을 보유하고 있다. 주위 수온변화에 대한 음향감도의 상대적인 안정성은 air cavity가 삽입된 중공 나일론 충상복합체를 이용한 맨드릴형 광·음향센서가 가장 우수한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

This paper describes the sensitivity stability of a mandrel type fiber optic acoustic sensor with respect to its environmental conditions such as hydrostatic pressure and underwater temperature. The sensors under consideration have various mandrel structures such as a cylindrical mandrel, a concentric composite mandrel, and an air-backed concentric composite mandrel. The analysis results show that the sensors have such good robustness, less than 0.15dB, in its sensitivity with respect to the variation in hydrostatic pressure. Further, the nylon concentric composite mandrel type sensor including an air cavity turns out to have the most superior stability than others to the underwater temperature variations.

I. 서 론

맨드릴형 광-음향센서는 유연한 탄성체인 맨드릴 음향 감지부 주위에 광섬유가 감겨져 있는 형태이고, 수십 kHz 이하의 주파수 대역에서 사용된다^[1-3]. 인가된 외부 음향신호에 의한 맨드릴의 변형이 광섬유에 전달되고, 광 섬유의 변형량에 비례한 광신호의 위상차를 측정함으로 써 외부에서 인가된 음향신호를 분석할 수 있다. 이러한 맨드릴형 광-음향센서는 직선형 혹은 코일형 광섬유 음향 센서보다 기하학적으로 음향감지부의 다양성을 보유하고 있고, 기구적으로 튼튼하여 요동을 일으키는 수중에서도 측정이 용이하며, 비교적 높은 감도와 신뢰성을 가진다. 또한 음향감지부를 구성하는 부품의 물성과 형상적인 가변 요소 들을 걱절히 조정함으로써 주피수 대역과 감도특성 등의 요구 되는 사양에 적절히 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 맨드릴형 광 음향센서는 수중의 수압과 수온 등 사용 환경이 변화하는 조건에서 사용되고, 이들 사용환경 변화 에 의해 음향감도 특성이 영향을 받는다. Hughes 등^[4]은

정수압에 대한 광섬유 자체의 감도특성을 이론적으로 분석 하였고, Hocker^[5]는 주위 압력과 온도변화시 코일형 광·음향 센서의 감도변화를 연구하였다. 코일형 광·음향센서의 음향 감도는 주위 정수압의 변화에 의해 약 -4.09 × 10⁵ rad/Pa-m 정도 감소하고, 주위 수온변화에 의해 약 107 rad/°C-m 정도 증가하며 주위 수온변화에 훨씬 민감한 특 성을 보유하고 있다고 한다^[5] 맨드릴형 광·음향센서에 대한 수중 정수압과 수온에 의한 영향은 지금까지 보고된 바 없고, 이들 사용환경에 의한 음향감도 변화를 예측하여 맨드릴형 광·음향센서의 환경 안정성을 평가하여야 한다.

본 연구에서는 자금까지의 선행연구¹⁶⁻¹⁰를 근거로 하여 광-음향센서의 음향감지부의 구조로 실린더형 맨드릴¹⁶⁻⁷¹, 알루미늄과 나일론을 기본 맨드릴로 사용한 중공 충상복 합체 맨드릴(concentric composite mandrel; 이하 "CCM" 으로 표기)^{18-9]}, air cavity가 삽입된 나일론 중공 충상복합 체 맨드릴(air-backed Nylon concentric composite mandrel; 이하 air-backed Nylon concentric composite mandrel; 이하 air-backed Nylon-CCM으로 표기)¹¹⁰¹을 선 정하였고, 구체적인 맨드릴의 형상과 구성부품의 물성은 표 1과 같다. 그리고 유한요소법을 이용하여 수중 정수압 변화와 수온 변화에 따른 맨드릴형 광-음향센서의 감도특성 을 분석하고, 주위 사용환경에 대한 안정성을 평가하였다.

^{*} 포항산업과학연구원 재료공정연구센터

^{**} 경북대학교 센서공학과 / 전자전기공학부 접수일자: 1999년 4월 6일

표 1. 맨드릴의 형상 및 맨드릴 구성부품의 물성 Table 1. Geometry of the mandrel and material properties of the constitutional parts the mandrel.

Mandrel type	Geometry	Parts	Material propertis
Cylindrical mandrel	OD = 5cm $L_m = 7cm$	Mandrel	$E = 1 GPa$ $\nu = 0.4$
AI-CCM	OD = 5cm; ID = 2cm $t_f = 7.5$ mm; $L_m = 7$ cm	Foaming	E = 1 GPa $\nu = 0.4$
Nylon-CCM	OD = 3cm; iD = 1.2cm $t_f = 4.5mm; L_m = 4cm$	Foaming	E = 1 GPa $\nu = 0.4$
Air-backed Nylon-CCM	OD = 3cm; ID = 0.3cm $t_f = 1mm; t_a = 3mm;$ $L_m = 3cm$	Foaming	E = 1 GPa $\nu = 0.4$

CCM: Concentric composite mandrel, OD: outer diameter, ID: inner diameter, L_m: length of the mandrel, t_i : thickness of the foaming, t_i : thickness of the air cavity, E: Youngs modulus, ν : Poisson's ratio

II. 이론적 배경

맨드릴형 광-음향센서에 외부 음향신호가 인가될 경우, 맨드릴이 반응하여 변형을 일으키게 되고, 광섬유에 변형이 전달되어 광섬유의 변형량에 비례한 광신호의 위상차가 발생하게 된다. 수중에서 식 (1)과 같은 일정한 주파수의 음향신호(Preconsic)가 광-음향센서에 인가될 경우, 광섬유에 유기된 광파의 위상차로 표현되는 센서의 상대적인 음향 감도는 식 (2)와 같이 나타내어 진다^[1, 6-7].

$$P_{acoustic} = P_a e^{j(wt \pm kx)} \tag{1}$$

$$S_{r} = \frac{\Delta \emptyset}{\emptyset^{P}_{acoustic}} = \left[\frac{\Delta l}{l} - \frac{n^{2}}{2} \left[\Pi_{11} * \sum \varepsilon_{r} + \Pi_{12} * (\sum \varepsilon_{\theta} + \sum \varepsilon_{z})\right]\right]$$
(2)

여기서 Po, ω 및 k는 각각 인가되는 음향신호의 전폭, 각주파수 및 파수를 의미한다. 또한 Ø는 광파의 위상을 의미하고, *l*, *n*, *IE*_j, c는 각각 광섬유의 길이, 굴절을, 광-탄성 상수 및 변형을 성분을 의미한다. 그리고 광-음향센서 의 감도를 dB(기준감도: S₀ = 1 rad/ µPa)로 표시할 경우,

$$S = 201 og \frac{S_r \emptyset}{S_0} dB$$
(3)

과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 알 수 있듯이, 음향감 도는 광섬유의 변형을 성분으로부터 계산되고, 광섬유의 변형을 성분은 구성부품의 재질 및 형상과 밀접한 관계 를 가지고 있다.

수중의 정수압에 의해 맨드릴형 광·음향센서의 감도변 화는 구성부품의 형상변화에 의한 영향과 내부 응력상태 의 변화에 의한 영향으로 이루어 진다. 모든 구성부품이 등방성 재질이라고 가정할 경우, 수중 정수압(Phydrostatic) 에 의한 구성부품의 변형을 성분은

$$\varepsilon_i = -\frac{P_{hydrostal_e}(1-2\nu)}{E} \tag{4}$$

과 같이 나타내어 진다^[11]. 여기서 E와 ν 는 각각 구성부 품의 탄성율 및 프와송 비를 의미한다. 또한 수중 정수압에 의해 내부 응력이 존재하게 되고, 이러한 초기 응력상태 에 의해 구성부품이 응력경화(stress stiffening) 되고, 외부 음향신호에 대한 구성부품의 반응성을 저하된다. 따라서 수중 정수압에 의해 광-음향센서의 형상변화와 응력경화 에 의해 감도특성이 영향을 받게 된다.

주위 수온변화 시 광·음향센서의 감도변화는 광·음향센서 의 형상변화 및 굴절을 변화에 의한 감도변화의 합으로 표현되고,

$$\frac{d\emptyset}{dT} = n \cdot k \cdot \frac{dl}{dT} + \frac{dn}{dT} \cdot k \cdot l$$
(5)

과 같이 나타내어 진다. 통상의 용용 실리카 광섬유의 경우, 온도변화에 의한 굴절율 변화는 -10~+19*10⁶9°C 정도의 값을 가지고 있다^[11]. 그러나 본 연구에서 고려한 맨드릴 형 광 음향센서의 경우, 동일한 재질 및 길이의 광섬유를 사용하였으므로 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화가 음 향감도에 미치는 영향은 동일할 것이다. 따라서 사용한 광섬유의 온도에 따른 굴절율 특성을 확인이 어렵고, 온도 에 의한 맨드릴형 음향센서의 감도특성을 상대 비교하기 위하여서 온도에 따른 광섬유의 굴절을 변화를 무시하였다.

표 2. 맨드릴형 광·음향센서 구성부품의 열적인 물성 Table 2. Thermal properties of the constitutional parts of the mandrel type fiber optic acoustic sensor(FOAS).

Materials	Thermal properties	Constitutional parts	
Optical fiber	α core: 5.5*10 ⁻⁷ / ⁶ C; α cladding: 10.2*10 ⁻⁶ / ⁶ C α axist: -9.18*10 ⁻⁶ / ⁶ C α radial: 64.1*10 ⁻⁶ / ⁶ C	Optical fiber	
Aluninum	a :22.7*10 [™] /°C	Concentric composite mandrel	
Nylon	α:215*10°/°C	Concentric composite mandrel	
	dE/dT:-0.4%		
Polymer	a :200*10°/°C	Cylindrical mandrel, Foaming layer	
	dE/dT:-0.5%		
Poly-urethane	a:180*10*/°C	Molding layer	
	dE/dT:-0.85%		

 α : Thermal expansion coefficients, E: Youngs modulus, T: Temperature

그리고 온도변화에 의한 광·음향센서의 형상변화는 광·음 향센서 구성 부품의 열팽창 계수와 연관되므로 이들에 관한 자료가 필요하다. 또한 구성 부품의 기계적 특성 역시 온도 의존성을 가지고 있어 주위 온도 변화 시 인가되는 음향신호에 대한 광·음향센서의 반응 특성이 변화하게 되는 요인으로 작용한다. 본 연구의 수온변화에 대한 광·음향 센서의 감도 특성 변화 해석 시 사용한 광·음향센서 구성 부품의 열적특성을 표 2에 나타내었다.

III. 유한요소법을 이용한 수치해석

수중의 정수압 변화와 수온 변화에 따른 맨드릴형 광용 향센서의 반응특성을 해석하기 위하여 선행연구[6기]에서 사용한 것과 동일한 유한요소 모델을 구성하고, 사용환경 변화에 따른 감도특성을 분석하였다. 해석의 경제성을 고려 하여 광섬유는 둥가화된 튜브로 모델링하였다. 유한 요소 모델링시 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링하였고, 맨드 릴형 광-음향센서는 전혀 구속되지 않은 자유로운 상태이 다. 또한 외부에서 인가되는 음원은 평면파라 가정하였고, 음 원과 반대되는 위치의 액체 매질은 경계면에서 전혀 반 사가 일어나지 않는 압력 해제 조건을 설정하였다. 수압 의 변화에 따른 감도변화를 분석하는 경우, 1기압에서 40 기압까지 2기압 간격으로 정수압을 인가하고, 광-음향센 서의 변형 해석을 하였다. 이 결과를 이용하여 광-음향센 서를 모델링하고, 1kHz의 음향신호를 인가하여 조화 해 석한 후 상세한 부모델을 구성하고, 재해석하여 수압변화 에 따른 감도변화를 분석하였다. 주위 수온 변화의 영향 을 분석하는 경우, 광-음향센서는 열적 평행상태, 즉, 온 도구배가 존재하지 않는 상태에 존재한다고 가정하고, 수 온을 0°C에서 50°C까지 5℃ 간격으로 변화시켜 25℃의 음향감도를 기준으로 하여 음향감도의 변화를 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 수압변화에 의한 영향

실린더 맨드릴⁽⁶⁻⁷⁾, AI-CCM 및 Nylon-CCM⁽⁸⁻⁹⁾, air-backed Nylon-CCM⁽¹⁰⁾을 음향감지부로 사용한 광-음향센서 각각 에 대한 주위 정수압 변화에 따른 음향감도 변화를 분석하 고, 그 결과를 각각 그림 1부터 그림 4까지 나타내었다. 수압의 변화에 따른 감도변화 분석위해, 1기압에서 40기 압까지 2기압 간격으로 정수압을 인가하고, 광-음향센서 의 변형 해석을 하고, 그 결과를 이용하여 1kHz의 음향 신호를 인가하여 수압변화에 따른 감도변화를 분석하였다.

정수압변화에 따른 맨드릴형 광-음향센서의 감도 특성 변화를 나타낸 결과(그림 1~그림 3)에서 알 수 있듯이, 주위 수압이 중가함에 따라 음향감도는 직선적으로 감소 하는 경향을 보이고 있다. 실린더 맨드릴을 사용하는 경 우(그림 1), 주위 수압이 40기압까지 증가함에 따라 음향 감도는 약 0.006dB 정도 감소한 것으로 분석되었다. Al-CCM 맨드릴을 사용하는 경우(그림 2), 음향감도는 약 0.013dB 정도 감소하였고, Nylon-CCM 맨드릴을 사용하 는 경우(그림 3), 약 0.005dB 정도 감소한 것으로 분석되 었다.



- 그림 1. 수중 정수압 변화에 따른 실린더 맨드릴형 광-음향센 서의 감도변화
- Fig. 1. Variations of the sensitivity of the cylindrical mandrel type FOAS with the hydrostatic pressure in water(ref. sensitivity: 1 rad/ µ Pa).





1 rad/ μ Pa).



그림 3. 수중 정수압 변화에 따른 Nylon-CCM FOAS의 감도변화

Fig. 3. Variations of the sensitivity of the Nylon-CCM FOAS with the hydrostatic pressure in water(ref. sensitivity: 1 rad/ μ Pa).



그립 4. 수중 정수압 변화에 따른 air-backed Nylon-CCM FOAS의 감도변화

Fig. 4. Variations of the sensitivity of the air-backed Nylon-CCM FOAS with the hydrostatic pressure in water (ref. sensitivity: 1 rad/ µ Pa).

또한 air-backed Nylon-CCM 맨드릴을 사용하는 경우(그 림 4), 음향감도는 약 0.15dB 정도 감소한 것으로 분석되 었다. 이상의 결과로부터 주위 정수압의 영향에 의해 Nylon-CCM 맨드릴형 광-음향센서가 가장 안정적이고, air-backed Nylon-CCM 맨드릴형 광-음향센서가 가장 영 향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 그러나 air-backed Nylon-CCM 맨드릴형 광-음향센서의 경우도 주위 수압에 의한 음향감도의 감소 폭이 0.15dB 미만이므로 본 연구 에서 고려한 맨드릴형 광-음향센서는 수압에 대하여 안정 적이라 결론 내려진다.

4.2. 수온변화에 의한 영향

맨드릴형 광·음향센서에 대하여 0°C에서 50°C까지의 각 5°C 단위로 주위 수온의 변화에 따른 음향 감도의 변 화를 분석하고, 그 결과를 그림 5부터 그림 8까지 나타내 었다. 이 결과들은, 광·음향센서가 열적 평행상태, 즉 온도구 배가 존재하지 않는 상태에 존재한다고 가정하고, 주위 수온을 25°C일 때 광·음향센서의 감도를 기준으로 하여 주위의 수온변화에 따른 감도 변화를 나타낸 것이다.



그림 5. 실린더 맨드릴형 팡-음향센서의 감도특성에 미치는 수 온의 영향

Fig. 5, Influence of the underwater temperature on the sensitivity of the cylindrical mandrel FOAS(ref sensitivity: 1 rad/ μ Pa).



그립 6. Al-CCM FOAS의 감도특성에 미치는 수온의 영향 Fig. 6. Influence of the underwater temperature on the sensitivity of the Al-CCM FOAS(ref. sensitivity: 1 rad/ µ Pa).



그림 7. Nylon-CCM FOAS의 감도특성에 미치는 수온의 영향 Fig. 7. Influence of the underwater temperature on the sensitivity of the Nylon-CCM FOAS(ref. sensitivity: 1 rad/ µ Pa).



- 그립 8. Air-backed Nylon-CCM FOAS의 감도특성에 미치는 수온의 영향.
- Fig. 8. Influence of the underwater temperature on the sensitivity of the air-backed Nylon-CCM FOAS(ref. sensitivity: 1 rad/ μ Pa).

주위 수온변화에 의한 광-음향센서의 감도 변화를 나 타낸 결과(그림 5~그림 8)에서 알 수 있듯이, 수온이 0° C에서 50°C까지 중가함에 따라 음향 감도는 선형적으로 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 실린더 맨드릴형 광-음향 센서(그림 5) 및 Al-CCM 맨드릴형 광-음향센서(그림 6)의 경우, 음향감도 변화폭은 약 -0.8dB에서 약 1dB까지 대략 1.8dB 정도 변화하는 것으로 분석되었다. 반면 Nylon-CCM 멘드럴형 광-음향센서(그림 7)의 경우, 약 -0.3dB에서 약 +0.5dB까지 대략 0.8dB 정도로 실린더 맨드릴 및 Al-CCM 을 이용한 광-음향센서의 감도변화 폭의 절반 정도에 해당 하는 것으로 분석되었다. 또한 상대적으로 두꺼운 포밍 (foaming)층 (5mm 두께)을 사용한 air-backed Nylon-CCM 맨드럴형 광-음향센서의 경우(그림 8), 수온변화에 의한 감도변화는 Nylon-CCM 맨드릴형 광-음향센서와 비슷한 감도변화를 보이지만, 상대적으로 얇은 포밍층 (1mm 두 께)을 사용하는 경우, 수온 변화에 의해 약 0.6dB정도의 변화를 보이는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 수온변화에 대한 광·음향센서의 감도 특성의 안정성은 air-backed Nylon-CCM 멘드릴형 광·음 향센서가 가장 우수하고, 실린더 맨드릴 및 Al-CCM을 이용한 광·음향센서가 가장 열악한 특성을 보이고 있다고 결론 내릴 수 있다. 향후 수온변화에 의한 광섬유 굴절을 변화를 고려하여 추가적유로 수온변화에 의한 감도변화 를 정밀하게 분석할 필요성이 있다.

수압변화 및 수온변화가 미치는 광음향센서의 감도에 미치는 영향을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. 맨 드릴형 광·음향센서는 주위 정수압이 40기압까지 중가함 에 따라 0.15dB 미만의 음향감도 변화를 나타내고, 수압 변화에 대해 안정적인 특성을 보유하고 있다. 또한 주위 수온변화에 대하여 상대적으로 Nylon-CCM 및 air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서가 안정적인 특성을 보유 하고 있고, air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서 가 보다 안정적이다. 그러므로 air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서가 수압 및 수은 동 사용환경 변화에 대해 가장 안정적인 특성을 보유하고 있다고 최종 결론 내릴 수 있다.

V.결론

본 논문은 주위 환경인 수압 및 수온변화에 따론 맨드릴 형 광·음향센서의 감도특성을 분석한 것에 관한 것이다. 음향감지부의 구조로는 실린더형, 중공 충상복합체형 및 air cavity가 삽입된 중공 충상복합체를 선정하고, 주위 수압과 수온변화에 따른 광·음향센서의 감도특성을 분석 하였다. 맨드릴형 광·음향센서는 주위 정수압의 변화에 대해 0.15dB 미만의 음향감도 변화를 나타내고, 수압변화 에 대해 안정적인 특성을 보유하고 있다. 또한 주위 수온 변화에 대하여 상대적으로 Nylon-CCM 및 air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서가 안정적인 특성을 보유 하고 있고, air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서 가 보다 안정적이다. 그러므로 air-backed Nylon-CCM을 이용한 광·음향센서가 수압 및 수온 등 사용환경 변화에 대해 가장 안정적인 특성을 보유하고 있다.

참 고 문 현

- i. 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, pp. 385~475, 1982.
- J. Jarzynski, R. Hughes, T. R. Hickman, J. A. Bucaro, "Frequency response of interferometric fiber optic coil hydrophone," J. of Acoust. Soc. Am. 69(6), pp. 1799, 1981.
- 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.
- R. Hughes and J. Jarzynski, "Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiber optic hydrophones," Applied Optic 19(1), pp. 98~107, 1980.
- 5. G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," Applied Optics 18(9), pp. 1445-1448, 1979
- 6 J. Im and Y. Roh, "A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone," J. of Acoust. Soc. Am. 103(5), Pt. 1, pp. 2425 ~ 2431, 1998.
- 7. 임종인, 노용래, "FEM을 이용한 맨드릴형 광-음향 수중청음 기의 설계에 관한 연구," 한국음향학회지 16(3), pp. 73~80, 1997.
- 임중인, 노용래, "중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로 폰의 최적 구조 설계," Part II. 맨드릴의 형상에 따른 광음 향 감도 특성, 한국음향학회지 17(4), pp. 30~37, 1998.
- 9. 임종안, 노용택, "중공형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로 폰의 최적 구조 설계," Part I. Forming층이 음파 전달 및 감도에 미치는 영향, 한국음향학회자 17(4), pp. 23~29, 1998.
- 임종안, 노용래, "Air cavity가 밴드릴형 광-윰향센서의 잡도. 특성에 미치는 영향, 한국음향학회지," 1999 (Submitted)
- S. Timoshenko and J. N. Goodier, *Theory of elasticity*, McGraw-Hill, New York, 1951.
- G. B. Morey, "Properties of Glass," in International Critical Table, Vol. 2, McGraw-Hill, New York, 1993.

▲임 종 인(Jong In Im)



1986년 2월 : 한양대학교 무기재료공 학과(공학사) 1989년 2월 : KAIST 재료공학과(공 학석사) 1999년 2월 : 정북대학교 센서공학과 (공학박사) 1989년 1월~현재 : 포항산업과학연

769년 - 1월~ 원재 : 포양간입과학연 구원 재료공정연구센터

1991년 2월~8월(마)Penn.State Univ., MRL 객원연구원 ※ 주판심분야: 센서 및 Actuator, MEMS, 전자재료 개발 및 응용

▲노 용 래(Yong Rae Roh) 한국음향학회지 제 17권 3호 참조