

다중모드 광섬유 마이크로벤딩을 이용한 하이드로폰에 관한연구

\* \*\* \*\*\*  
김 경 복, 박 한 구 차 일 환,  
\* 금성전선 연구소 \*\* 연세 전자공학과  
\*\*\*

A Study on the Hydrophone using the multimode Fiber-optic Microbending.

\* \*\* \*\*\*  
KIM KYUNG BOK Park Han Kyu Cha, H Whan

\* Gold Star Cable Co., R&D Section2. \*\* Dept of Electronics Eng. Yon Sei Univ

• 요약

본 논문에서는 그레이타드인덱스 다중모드 광섬유에 압력을 가함으로써 발생하는 마이크로벤딩을 모드 결합 이론으로 분석하고, 그 이론에 의해 모드결합이 최적으로 일어나는 정적벤딩을 통한 주기성을 얻어 시계품 광섬유 음향 트랜스듀서를 설계 및 그것을 이용한 광섬유음향센서를 제작하였다. 제작된 트랜스듀서의 탐지가능한 최소검출압력을 정적벤딩 실험을 통하여 계산하였으며 아울러 제작된 광섬유음향 트랜스듀서의 특성을 실험하였다.

• ABSTRACT

In this paper, the pressure-induced microbending in the parabolic-index multimode fibers is analyzed by using mode-coupling theory, and a proto-type optical fiber acoustic transducer with an optimum static-bending periodicity for mode coupling between propagating and radiating modes is designed and the Fiber-optic Acoustic Sensor employing it is made.

The minimum detectable pressure estimates based on the experimental studies of static-bending are presented along with performance characteristics of a proto-type transducer.

1. 서론

광섬유를 이용한 광학적 원리에 바탕을 둔 음향센서(Acoustic Sensors)는 센서 구성방식이 Interferometric 방식과 Non-Interferometric 방식으로 양립되고 있는 특징이 있다.

비록 Mach-Zehnder 광섬유 interferometric 방식의 센서 구성방식이 오늘날까지 광범위하게 발달되어 왔지만 최근들어 구성방식이 간단한 Non-Interferometric 방식의 음향센서에 대하여 급속한 발전을 이루는 가운데 관심이 고조되고 있다.

Non-Interferometric 방식의 음향센서는 주변환경 변화 요소에 덜민감하며, 다중모드 광섬유와 단일모드 광섬유 모두를 사용할 수 있는 알팅성의 특징이 있을뿐더러 그 구성방법에 따라 우수한 감도성(sensitivity)도 지니고 있다.

Non-Interferometric 센서는 다음과 같이 크게 두가지 범주로 분류할 수 있다.

첫째, 변조기(modulator) 또는 변환기(transducer)로 광섬유 내부차체에 광변화를 일으키는 광섬유 센서가 있고, 둘째, 변환(transduction)을 일으키는 "black box" 내부에서 광섬유의 광학적 신호를 변화시키는 하이브리드(hybrid)센서로 구분지을 수 있다.

이두범주의 대표적인 센서로써 마이크로벤딩센서(Microbending Sensor)와 그레이팅센서(grating Sensor)를 들 수 있다.

이들은 모두 수중음향센서(underwater acoustic sensor)로써 사용되는 장비들이다.

대부분의 음향센서는 수중에서 낮은소리조차 탐지할 수 있는 음향적 배경을 요구하므로 최소검출압력(minimum detection pressure)이 이들 센서의 특성을 평가하는 파라미터(parameter)인 것이다.

본 연구에서는 수중음압에 의한 다중모드 광섬유 Microbending으로 인하여 전송모드(guided mode)에서 모드결합(mode coupling)이 발생, 모드간의 힘의 재분배(power redistribution)현상으로 출력 광파워(optical power)변화를 일으키는 proto-type 광섬유 음향 변환기(Fiber-optic Acoustic transducer)를 설계 및 제작하여 준비된 수조에서 최소검출할 수 있는 압력을 측정함으로써 제작된 transducer의 특성을 이론과 실험을 통하여 평가하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1) 광섬유 마이크로벤딩 손실(Fiber-optic Microbending Loss)

광섬유내에서 전송모드가 변형에 따른 모드결합이 일어나 힘의 재분배 현상이 발생. 이는 모드필터(mode filter)와 광검출기(photo detector)에서 감지할 수 있다.

광파워는 전송되는 코어모드(core modes)와 코어에서부터 방사되는 방사모드(Radiation Modes)로써 결부시켜 생각할 수 있는데 방사모드 중에는 다시 광섬유 1차 코팅(primary coating)인 polymer로 완전히 피쳐 나가는 모드가 있고 클래드층을 따라 계속적으로 전송되는 클래드모드(clad modes)로 나눌 수 있다.

광섬유에서 광파워의 강한 손실은 광변조기의 공간적 분포의 파수가 광섬유의 전파모드(propagating modes)와 방사모드의 파수차와 같을 때 가장 강하게 일어난다.

광섬유의 축을 따른 기계적 구부림주기 파장을  $\Lambda$ 라 하고 광섬유 축방향의 전파상수를  $\beta$ 와  $\beta'$ 이라 두면

$$\beta - \beta' = \pm \frac{2\pi}{\Lambda} \quad \text{----- (1)}$$

이 성립하는  $\beta$ 와  $\beta'$  모드간의 결합이 발생한다고 알려져 있다. WKB 근사식을 사용할 때 종종 광섬유내의 전파상수사이에는 이때와 같은 근사식이 성립된다.

$$\delta\beta = \beta_{m+1} - \beta_m = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{1/2} \frac{2\sqrt{\alpha}}{\alpha} \left(\frac{m}{N}\right)^{\frac{\alpha-2}{2\alpha}} \quad \text{----- (2)}$$

여기서  $n$ 은 모드번호(mode Label),  $N$ 은 총모드수,  $a$ 는 코어반경,  $\alpha$ 는 굴절률 승의 법칙(power Law)으로 나타낼 때의 지수로서 아래식에서 사용된다.

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right] & \text{For } r < a \\ n_2 (1 - \Delta) = n_0 & \text{For } r > a \end{cases} \quad \text{----- (3)}$$

여기서  $n(r)$ 은 광섬유 굴절률,  $n_1$ 은 코어중심의 굴절률,  $n_2$ 는 클래드의 굴절률이고  $\Delta$ 는 코어중심과 클래드 사이의 굴절률차로써 이때 식으로 표현된다.

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \quad \text{----- (4)}$$

광섬유의 굴절률  $\alpha=2$ 인 그레이이드 광섬유의 경우 식(2)에 의해 아래와 같이 된다.

$$\delta\beta = \frac{\sqrt{2\Delta}}{\alpha} \quad \text{----- (5)}$$

식(5)에서 그레이이드 광섬유의  $\delta\beta$ 는 모드번호  $n$ 과 무관하며 모든 모드는  $K$ 공간상에서 같은  $\delta\beta$ 의 간격으로 떨어져 있음을 의미한다. 따라서 그레이이드 광섬유에서는 이웃하는 모드 사이에 최적의 모드 결합이 일어나는 임계역늘림파장(critical distortion wavelength)  $\Lambda_c$ 가 존재한다.

식(1)과 식(5)에서 임계역늘림파장  $\Lambda_c$ 는 다음같이 구해진다

$$\Lambda_c = \pi\alpha \sqrt{2/\Delta} \quad \text{---- (6)}$$

스텝인덱스 광섬유는 굴절률  $\alpha=\infty$ 가 되므로 임계역늘림 파장이 같은 간격으로 존재하지 않으나 식(2)에서  $\alpha=\infty$ 를 대입하면

$$\delta\beta = \frac{\pi\Delta}{\alpha} \cdot \frac{m}{N} \quad \text{---- (7)}$$

다시 식(1)과 식(6)에서 역늘림파장(distortion wavelength)  $\Lambda$ 를 구할 수 있다.

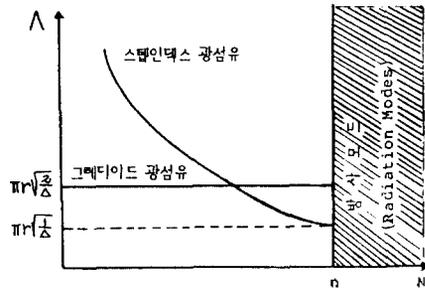
$$\Lambda = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{\Delta}} \left(\frac{N}{m}\right) \quad \text{---- (8)}$$

스텝인덱스 광섬유를  $K$ 공간상에서 각 모드간격이 모드번호  $n$ 에 관계되어 있고 고차모드(large  $n$ )일수록 공간적 주기성이 점점 작아지는 반면 저차모드(small  $n$ )는 커다란 주기와 결부되어 있다. 따라서 마이크로벤딩 손실은 코어에서 방사되는 모드결합에 기초를 두고 있는지라 스텝인덱스 광섬유 선사의 고감도(high sensitivity)를 얻으려면 가장 고차 코어모드에서 방사되는 모드와 관련되는 임계역늘림 파장에 기대할 수 밖에 없다.

그러므로 스텝인덱스 광섬유의 임계역늘림파장  $\Lambda_c$ 는  $n=N$  관계를 가질 때 대략 그 값을 얻을 수 있다.

$$\Lambda_c = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{\Delta}} \quad \text{---- (9)}$$

그림(1)은 이들 관계의 특성을 나타낸 그림이다.

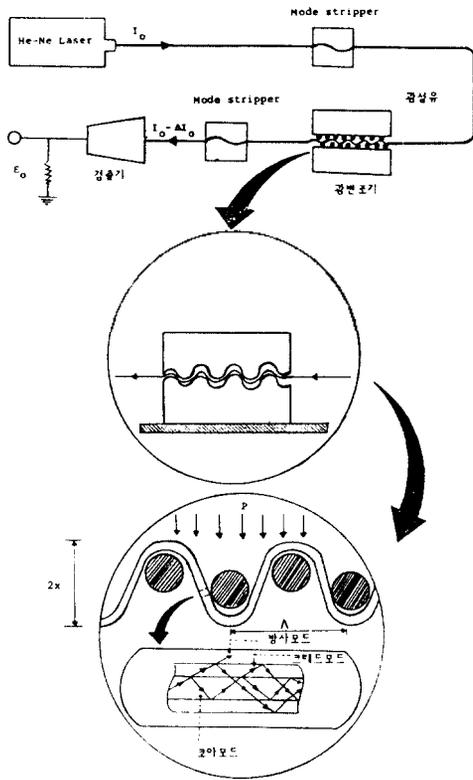


그림(1) : 그레이이드, 스텝인덱스 광섬유 특성 ( $\Lambda$ )

### 2) 마이크로 벤딩 손실 하이드론 본식

(Microbending-Loss hydrophone analysis)

광섬유의 기계적 벤딩손실에 대한 음압감도를 이론적으로 분석하여 상업용 광섬유를 사용한 transducer의 탐지가 가능한 최소검출압력을 이론적으로 분석하기 위하여 본 연구에서는 transducer의 신호잡음비를 shot-noise로 제한된 수신기로서 가정하고, 이때 탐지가 가능한 최소검출압력의 신호잡음비(SNR)는 1로 가정하여 계산한다.



·영2 마이크로변형 광섬유 입력센서

길이  $l$  이고 감쇄계수( attenuation coefficient)가  $\alpha$  인 광섬유를 통과한 후 검출단의 광검출기에 입사되는 광파워를  $W_0 10^{-\alpha l}$  이라 하자

여기서  $T$  는 Transducer의 전송계수,  $W_0$  는 광섬유에 입사되는 광원의 입력파워이다. 음파  $P_s$  를 transducer에 변화시켰을 때 전송계수( transmission coefficient)는  $T + \Delta T$  로 변화되어 탐지된 신호도  $\Delta T W_0 10^{-\alpha l}$  로 된다.

이때 탐지기에 흐르는 신호전류는 다음과 같다.

$$i_s = (q e W_0 / h \nu) 10^{-\alpha l} \Delta T \quad \text{---(10)}$$

여기서

$q$  = 탐지기의 양자효율( quantum efficiency)

$e$  = 전자하( electronic charge)

$h$  = Planck's frequency

$\nu$  = 레이저 주파수( Laser frequency)

$l$  = 센서 구성에 사용된 광섬유 총길이

이다.

이때 광섬유를 통과하는 변조된 전송전력은 아래식으로 주어진다.

$$\Delta T = \left( \frac{dT}{dx} \right) A \Delta x \quad \text{---(11)}$$

여기서  $A$  는 Transducer에 음압이 가해지는 진동판( diaphragm)의 면적이다. 자음을 한 후 평균된 샷노이즈( mean-square shot noise) 는 아래식으로 주어진다.

$$i_{SN} = 2e (q e / h \nu) (W_0 T e^{-\alpha l}) \Delta f \quad \text{---(12)}$$

여기서  $\Delta f$  는 탐지기 대역폭( detection bandwidth), 이때 신호 잡음비는 다음과 같다.

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_{SN}^2} = \frac{q W_0 10^{-2\alpha l}}{2 e h \nu T \Delta f} \left( A \frac{dT}{dx} \right)^{-2} \quad \text{---(13)}$$

따라서 shot-noise가 제한된 수신기로써 가정하면  $SNR=1$  일때 식(13)에서 탐지가 가능한 최소검출압력  $P_s$  는 다음과 같이 된다.

$$(P_s)_{min} = \left( \frac{2 T h \nu \Delta f}{q W_0 10^{-2\alpha l}} \right)^{1/2} \left( A \frac{dT}{dx} \right)^{-1} \quad \text{---(14)}$$

여기서  $\frac{dT}{dx}$  는 transducer의 계수로써 정적변형( static bending) 실험에서 얻은 측정치이며 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\frac{dT}{dx} = \left( \frac{dT}{dx} \right) \left( \frac{dx}{dP} \right) \quad \text{---(15)}$$

여기서  $dx$  는 광섬유 구부러짐 크기 변화.

$\left( \frac{dT}{dx} \right)$  항은 광섬유 마이크로변형손실의 감도로써 광학적 파라미터( optical parameter) 이고  $\left( \frac{dx}{dP} \right)$  항은 음파와 센서의 기계적 설계와 관련된 기계적파라미터( mechanical parameter) 인 것이다.

### 3) Transducer의 설계 및 제작

광섬유 음향센서 응답과 최소검출압력을 신축하기 위하여 표준화된 변조지수( normalized modulation index)  $M$  은 다음과 같이 정의된다.

$$M = W / W_0 P \quad \text{---(16)}$$

여기서  $W$  는 총출력 광파워  $W_0$  에서 유기된 변위량이고,  $P$  는 음압( Acoustic pressure) 이다.

변조지수  $M$  은 센서의 특성을 결정 짓는데 필요한 센서 응답( Sensor Response) 과 최소검출압력 산출과 밀접한 관계를 지니고 있으며 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$M = \left( \frac{dT}{dx} \right) \left( \frac{dx}{dP} \right) \quad \text{---(17)}$$

대부분의 마이크로 변형 센서에 있어서 음파는 입력멀티프라이어( pressure multipliers) 로써 사용되고 있는 음파연결기( Acoustic couplers) 를 통하여 간접적으로 광섬유에 적용되고 있다. 식(17)에서와 같이 센서의 변조지수  $M$  을 결정하는 2개의 중요한 파라미터는 광학적 파라미터  $\left( \frac{dT}{dx} \right)$  와 기계적파라미터  $\left( \frac{dx}{dP} \right)$  로 나누어진다.

제작된 transducer는 그림(3)과 같이 크게 4가지 부품으로 구성되어 있다. 수중에서 음파를 포집하여 구부림주기 상자( deformer box) 에 음압을 전달 시켜주는 진동판( diaphragm), 광섬유 마이크로변형손실을 일으켜주는 구부림주기 상자부, 구부림주기 상자를 지지하면서 높. 낮이를 조절할 수 있도록 제작된 삼발이와 구성부품 전체를 감싸는 몸통부( housing) 로 구성되어 있다.

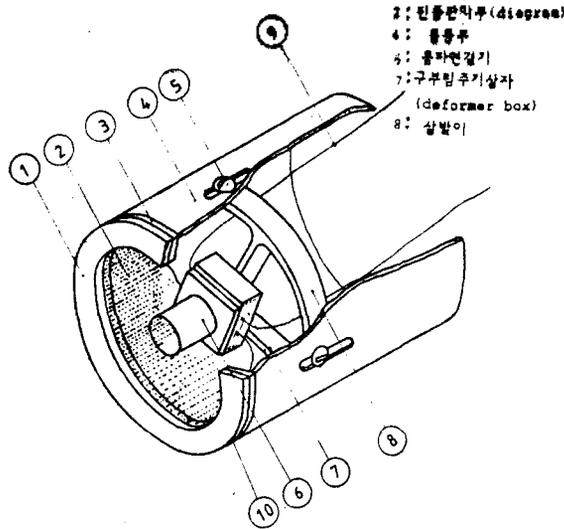


그림 (3) : proto-type 광섬유음향 transducer

### III. 실험 및 결과고찰

#### 1) 정적변형 (static bending)

식(17)에서의  $\Delta T/\Delta F$  값이 센서의 특성을 결정짓는 변조지수M의 광학적 파라미터( $\frac{dI}{dx}$ )의 최적조건을 얻기위하여 그림(4)와 같이 극내에서 제조된 3종류의 통신용 다중모드 그레이디드 인덱스 광섬유로서 다음과 같이 실험을 하였다. 광원은 출력이 4mW, 파장이 0.63 $\mu$ m인 He-Ne Laser를 사용 하였으며 광섬유 시단부에 입사되는 레이저빔(Laser beam)의 최대정렬(Alignment)을 위하여 정교한 미세위치조정기(Micro-positioner)를 사용하여 입사빔의 최대 N.A 상태(high launch)를 확인한다.

메이저에서 나온빔 (beam)은 대물렌즈를 통과한후 광섬유코어에 최대한 빔이 입사되도록 별도의 스크린(screen)을 통하여 확인한후 모드스크램블링(mode scrambling)과 모드스트리핑(mode stripping)을 통하여 광섬유내에 존재하는 고차모드와 플레드모드가 제거되도록 하였다.

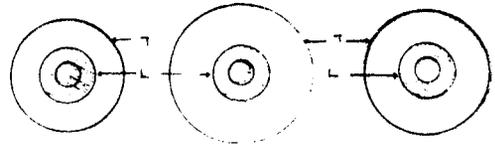
가해지는 힘을 가변시킬 수 있고 구부림구기( $\Delta$ )를 변화시킬 수 있도록 제작된 광변조기를 통하여 나온빔은 다시 모드스트리핑을 거친후 광전력미터(optical power meter)에 입사되어 광파워를 측정하였다.

광변조기에 가해진 힘(F)은 0.5N, 1N, 1.5N, 2N, 2.5N, 3N, 3.5N, 4N, 4.5N, 5N 광변조기의 구부림구기( $\Delta$ )는 2.2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm 7종류의 구부림구기들을 균일한 스텝인크스 급속봉으로 제작하여 사용했다.

그림(6)의 측정결과를 살펴보면 A, B, C 3종류 광섬유 모두

$\Delta=5mm$  에서  $\Delta T/\Delta F$  값이 증가하여  $\Delta T/\Delta F$  최대값은  $\Delta=6-7mm$  사이에서 본포도를 형성하였으며  $\Delta=8mm$ 에서는 다시 감소하였다.

이는 실험에 사용된 그레이디드인덱스 광섬유에서의 이웃하는 모드사이에서 최대의 모드결합이 일어나는  $\Delta_c=2.23mm$ 보다 약  $3/\Delta_c$  마장대에서 형성된 측정값으로써 기계적 파라메타인 탄성계수의 영향이 지배적 이었음을 알 수 있다.



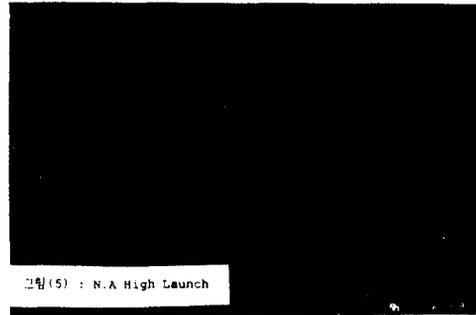
Type	A	B	C
외경 (mm)	345	590	180
코어 (mm)	50/125	50/125	50/125
클리어 (mm)	1.47/1.452	1.469/1.452	1.473/1.450
Loss @ 0.85um (3m)	5.03/2.31 (dB/km)	4.96/2.25 (dB/km)	5.08/2.28 (dB/km)

그림(4) A, B, C 광섬유 직경 및 특성

또한  $\Delta=6-7mm$  사이에서  $\Delta T/\Delta F$  값이 최대값을 형성하면서 C Type 광섬유는 A Type 광섬유의  $\Delta T/\Delta F$  최대값에 70%

수준에 B Type 광섬유는 A Type 광섬유의  $\Delta T/\Delta F$  최대값에 76%

수준에 머무는 각각의 차이값을 두고 있다. 이는 각각의 광섬유가 제원과 특성이 비슷하여도 1차코팅 물질인 polymer의 물질과 두께에 절대적 영향을 미치는 것으로 해석된다.



그림(5) : N.A High Launch

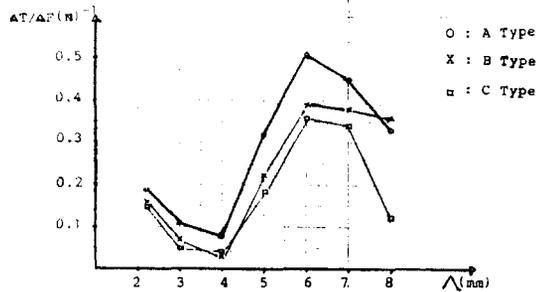


그림 16) A, B, C type 광섬유의  $\Delta T/\Delta F$  (Static bending)

#### 2) proto-type transducer 특성

proto-type 광섬유 음향 transducer를 사용한 음파음압 측정시스템은 그림(7)과 같이 설계하여 구성하였다.

광원은 파장이 0.63 $\mu$ m, 4mW He-Ne Laser, 광섬유는 정적 변형 특성에서 우수한 감도성을 지닌 A Type으로  $\Delta$  는

0.009938 코이플럼( $n_1$ )은 1.4717, 플레드글질름( $n_2$ )은 1.457 사용된 광섬유길이( $L$ )은 약 8m transducer의 진동판막( $r=3.5\text{cm}$ )은 폴리에스틸 필름막( $t=0.2\text{mm}$ ),  $\lambda=6\text{mm}$ , 외부음원은 최대출력 20W인 4Inch coaxial 스피커, 음파발전기(입력 3V)로 실험주파수 범위(0.1KHZ-1.5KHZ)를 0.1KHZ 간격으로 가변시켰다.

존비된 수조는 별도 calibration이 안된  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ 이며 이를 실제적으로 calibration하기 위하여 압력 gage를 부착시켰다. 검출기는 photo-diode(20HZ-20KHZ)이고 검출기에서 검출된 신호를 처리하기 위하여 별도의 증폭회로단을 만들어 7854 oscilloscope, Micro-computer와 Hard copy machine으로 신호처리를 하였다.

그림(8)은 본 실험에서 측정된 transducer의 특성을 나타낸 결과 그림이다.

식(14)의 이론식에서 제작된 transducer의 정적 파라메타 값, 즉  $T=3.87$ 에서  $dT/dF=0.5(N)^{-1}$ ,  $\gamma=4.76 \times 10^{14}$  (HZ),  $\eta=0.8$ ,  $\alpha=5.03$  (dB/Km),  $\lambda=3.84 \times 10^{-3}$  ( $\text{m}^2$ ),  $\omega_0=4 \times 10^{-3}$  (W) 이고  $\Delta f=1$  (HZ),  $L=1$  (Km)라고 가정하면 제작된 transducer의 최소검출압력( $P_s$ )<sub>min</sub>은 153dB re  $\mu\text{pascal}$ 이 된다.

본 실험결과에서 얻은 transducer의 최소검출할 수 있는 압력수준은 외부음원의 출력이 1W이고, 사용주파수가 0.9KHZ 일때 181dB re  $\mu\text{pascal}$  이며 7854 oscilloscope에 검출된 신호를 Hard copy machine으로 기록된 응답 신호는 그림(9)와 같다.

또한 1.1KHZ에서는 0.9KHZ때보다 18dB 정도가 높은 199dB re  $\mu\text{pascal}$ 의 ( $P_s$ )<sub>min</sub>이며 Hard copy machine에 기록된 응답 신호는 그림(10)과 같다.

그림(8)과 같이 본 실험에 제작된 transducer는 0.1-1.5 KHZ의 각각의 주파수에서 차이값이 20dB 범위의 본포도플 형성하고 있으며 이론적인 계산값보다 30dB 정도 높은 값을 나타내고 있다.

이것은 음파와 센서의 기계적 설계와 관련된 기계적 파라메타  $dx/dp$ 에서 발생하는 차이값으로 해석된다.

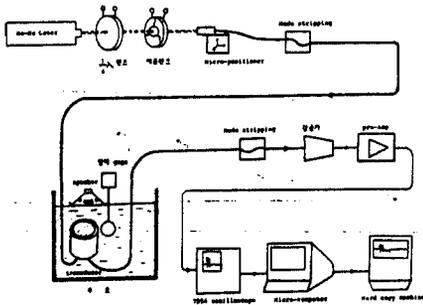


그림 (7) 음파응답 측정 system 기호도

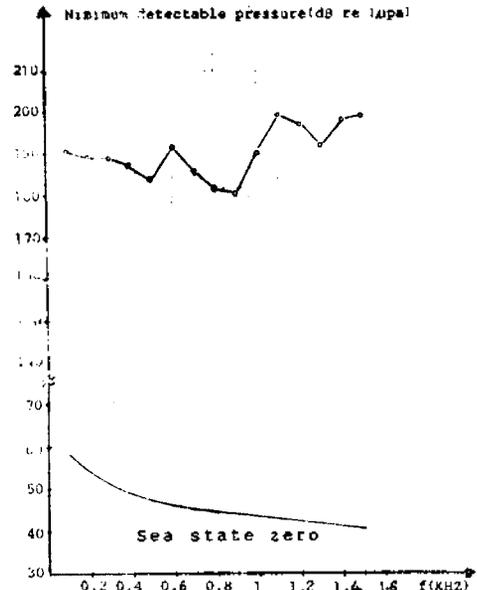


그림 (8) proto-type transducer의 최소검출 압력특성

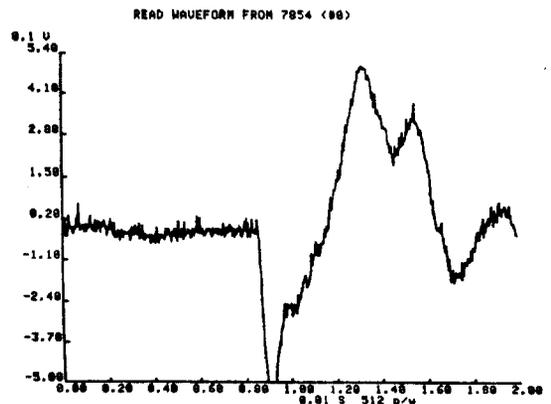
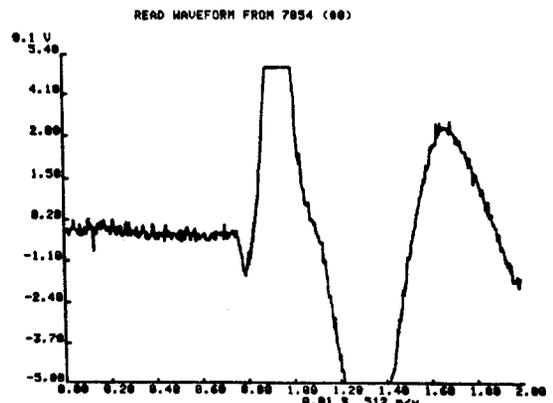


그림 (9) 0.9KHZ때의 7854 oscilloscope에 검출된 신호



본 연구에서는 proto-Type 광섬유 음향 transducer를 설계 및 제작하여 준비된 수조에서 최소검출압력을 측정함으로써 제작된 transducer의 특성을 이론과 실험을 통하여 평가 하였다.

사용된 광섬유는 국내에서 제조된 통신용 다중모드 그레이디드 인덱스 광섬유로써 정적변형 실험을 통하여 우수한 마이크로 변형손실 효과를 확인 했으며 또한 광섬유 1차코팅물질과 코팅 두께에 영향을 받는다는 사실도 확인했다. 따라서 아크릴레이트 수지 코팅 광섬유가 압력센서용으로 비교적 우수한 감도성을 지니고 있어 선서용 광섬유로써 사용가능성을 발견했다.

제작된 transducer의 광세기를 변조하기 위하여 이론에 따른 최적모드결합이 발생하는  $\lambda_c = 2.2\mu\text{m}$ 보다 대략 3고조파( $3\lambda_c$ ) 인  $\lambda = 6.6\mu\text{m}$ 에서 최대  $dT/dF$  값을 나타내었다.

본 실험에서, 제작된 transducer는 이론적에 의하여 계산된 최소검출압력 값보다 30dB 정도 오차 범위가 나타났다.

이는 센서의 변조지수에서 ( $dx/dp$ )항의 기계적인 파라메타인 센서의 기계적공진, 즉 광섬유와 음파연결기의 탄성효과, 수중에서 음파를 포집하는 진동판막재질의 결합에서 발생하는 요인으로 분석되며, 좀더 자세한 연구분석을 통하여 정확한 원인을 규명지을 수 있겠다.

앞으로 국내에서 제조된 광섬유로써 Non-Interferometric 방식의 음향센서를 제작할때 센서의 기계적파라메타의 정교한 설계에 역점을 두면 국내에서도 상용가능한 광섬유음향 선서를 제작할 수 있다.

끝으로 본 연구에 조언과 질책으로 격려하여주신 금성전선 연구소 소장님과 부소장님 그리고 많은 도움을 주신 최홍근, 양길호 연구원께 감사드립니다.

1. J.H cole, N.Lagakos, J.A.Bucaro  
"Advances in Fiber optic based Acoustic Sensors", SPIE VOL 326 Fiber optics-technology '82(1982) PP116-126
2. E.F carome and M.P Statyshur  
"Optical Fiber Acoustic Sensor"  
Fiber optics, Edited by B.Bendow and S.S. Mitra pp657-677
3. J.A. Bucaro  
"Optical Fiber Acoustic Sensor"  
Fiber optics Edited by B.Bendow and S.S Mitra PP641-656
4. J.A. Bucaro, J.H. cole, J.Jarzynski, W.K. Burns and T.G. Giallorenzi  
"Optical Fiber Sensor development"  
physics of Fiber optics, Vol.2. Advances in ceramics, Amer ceramic soc 1981. PP493-514
5. B. Culshaw, D.E.N. Davies, and S.A. Kingsley  
"Multimode optical Fiber Sensors"  
physics of Fiber optics, Vol2, Advances In ceramics, Amer Ceramic Soc 1981 PP515-528
6. J.N. Fields, C.K. Asawa, C.P. Smith, and R.J Morrison "Fiber-optic hydrophone"  
physics of Fiber optics VOL2 Advances In ceramics Amer ceramic soc 1981 PP529-538
7. N.Lagakos, P.Macedo, T.Litovitz, R.Mohr, and R.Meister  
"Fiber optic displacement sensor"  
physics of fiber optics VOL2 Advances In ceramics.  
Amer ceramic soc 1981 PP539-544
8. "Fiber optic sensor technology Handbook"  
Edited by C.M. Daris, E.F. carome.  
chapter 5 PP7-12