
광 CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템의 특성 분석

박상조* · 김봉규**

The Performance Analysis of Optical CDMA based Acoustic Sensor System using Optical Fiber Sensors

Sangjo Park* · Bong Kyu Kim**

요 약

바닷속과 같은 수중에서 1개의 광섬유에 다량의 배열형 광센서를 접속하여 광범위한 영역에서의 원격 측정도 가능한 광 CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템을 제안한다. 그리고 제안 시스템에서 잡음특성을 이론적으로 분석하고 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 그 결과를 분석한다. 광 CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템에서 센서의 측정시간을 증가시키면 종래의 WDMA 방식을 적용할 경우 보다 많은 광센서가 접속 가능한 것을 알 수 있다.

ABSTRACT

We propose the optical CDMA based audio acoustic sensor using optical fiber sensors which can be used in the bottom of the sea. In the proposed network, we analyzed the performance of noise power. Numerical simulations confirm that the performance can be improved by increasing the measuring time of optical sensors compared with using conventional WDMA method.

키워드

PN 부호(PN sequence code), 광 센서 네트워크(Optical sensor network), 광 CDMA(Optical CDMA), 마하젠더형 간섭계(MZI), 광센서(optical sensor)

I. 서 론

최근 안전한 환경 조성, 환경오염물질 검출 등 인간의 웰빙에 대한 관심이 고조되고 있다. 다양한 환경오염 물질 검출, 주거환경의 안전 점검, 구조물의 안전진단 등을 위하여 많은 센서들이 생활환경에 적용될 예정이다. 광섬유를 이용한 광센서의 경우에는 광섬유에 인가되는

외부 신호에 대하여 광섬유 안에 통과하는 빛에 유도되는 특성 변화를 측정하게 된다. 측정할 수 있는 신호로는 압력, 온도, 파동, 화학물질의 농도 등의 다양한 종류의 물리량을 포함하고 있다. 광섬유 센서의 장점으로는 전 기소자 대신에 광을 이용하여 측정하기 때문에 전자파에 의한 잡음이 없이 먼 거리에 분포되어 있는 여러 지점에서 물리량을 정밀하게 측정할 수 있고, 전기를 사용하

* 서원대학교 정보통신공학과

** 한국전자통신연구원 BT융합기술연구부 바이오센서팀

지 않기 때문에 물속에서의 감전이나 누전에 의한 화재 발생의 염려가 없다는 점 등이다.

다양한 정보를 측정하고 분석해야하는 유비쿼터스 시스템에서 하나의 신호처리 장치에 많은 센서들을 연결하여 물리량을 측정하는 센서 네트워크 기술이 요구되고 있다. 또한, 현재까지 광센서의 비용이 비싼 단점을 지니고 있기 때문에 하나의 신호처리 장치를 이용하여 많은 센서들을 연결하여 물리량을 측정함으로써 단위 센서당 비용을 절감하는 효과를 추가적으로 얻을 수 있다. 광센서 네트워크의 경우 한 개의 광섬유에 다량의 배열형 광센서를 접속하여 광범위한 영역에서의 원격 측정도 가능하고, 변전소, 수중, 발전소 및 군사시설 등의 특수 환경에서의 응용이 가능하다.

여러 센서들을 결합하고 각각의 센서들을 구별하는 방식으로는 파장분할 다원접속(wavelength division multiple access; WDMA) 방식, 시간분할 다원접속(time division multiple access; TDMA) 방식, 공간분할 다원접속(SDMA) 방식, 부호분할 다원접속(code division multiple access; CDMA) 방식[1][2] 등이 있다. WDMA 방식의 광 센서 네트워크는 외부환경 또는 측정 물리량의 변화에 의한 파장이동으로 인하여 약 70개 이하의 센서들을 연결하고, 동일한 센서를 연결하기가 어려운 점이 있으며 [3], TDMA 방식은 짧은 폭은 펄스를 출력하는 광원과 고속의 스위칭 회로를 필요로 하여 구성이 다소

복잡한 특징을 지니며, 공간분할 다중화 방식은 여러 개의 신호처리장치를 필요로 하여 비용 면에서 불리한 특징을 지닌다[4].

한편, CDMA 방식의 광센서 네트워크는 다른 형태의 센서 및 동일한 센서의 연결이 쉽고, 센서를 추가하기가 쉬운 특징을 가진다. 본 논문에서는 바닷속과 같은 수중에서 1개의 광섬유에 다량의 배열형 광센서를 접속하여 광범위한 영역에서의 원격 측정도 가능한 광 CDMA 방식 기반 광섬유 센서[5][6]를 이용한 음파탐지 시스템을 제안하고, 잡음특성을 이론적으로 분석하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 연결 가능한 광센서의 수 등을 분석하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 광 CDMA 방식 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템을 제안한다. 제3장에서는 잡음특성을 이론적으로 분석한다. 그리고 제4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 연결 가능한 광센서의 수량 등을 분석한다.

II. CDMA 방식 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템

광 CDMA 방식 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템은 (그림 1)과 같다. 시프트 레지스터에 의해 생성

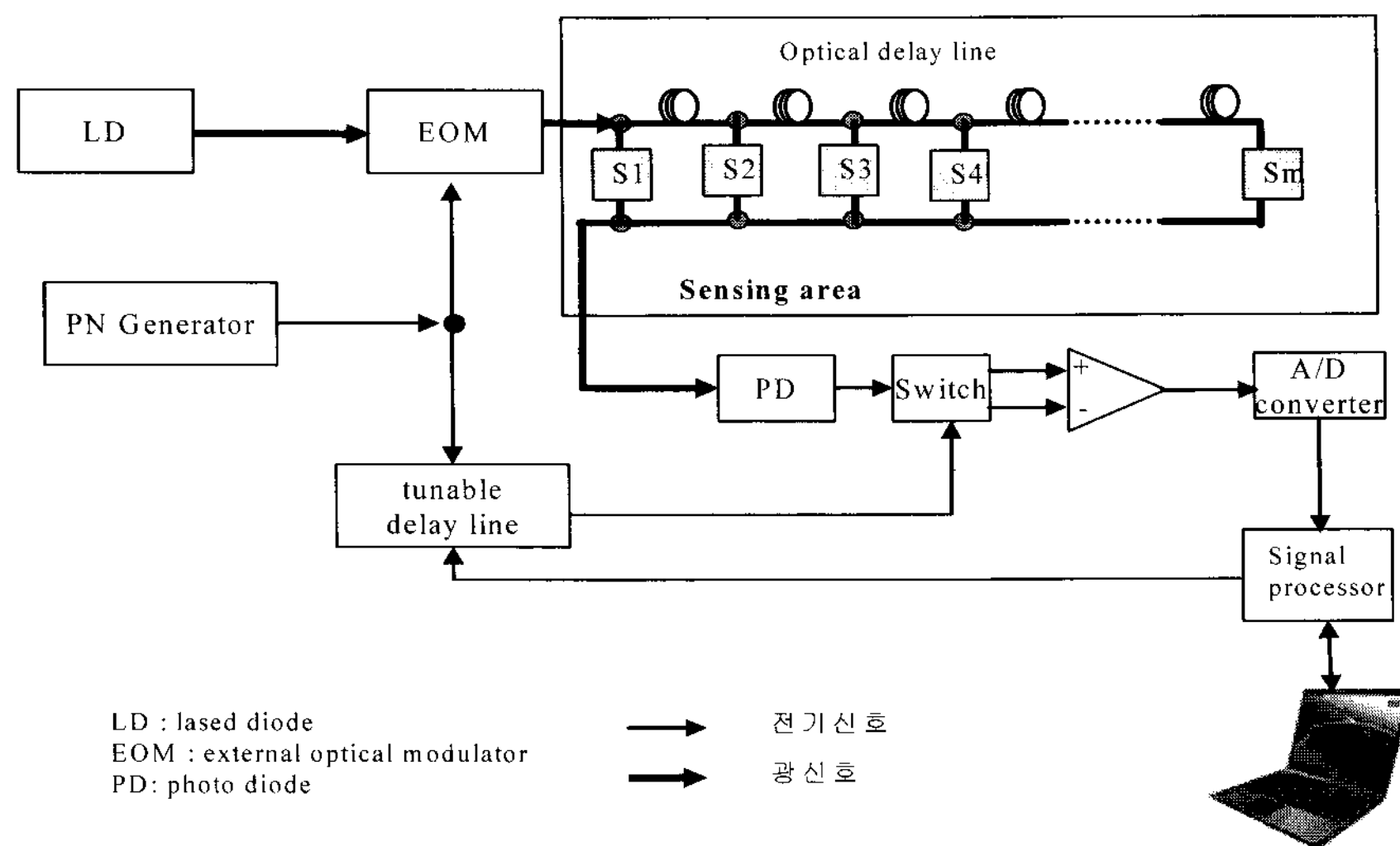


그림 1. 광 CDMA 방식 기반의 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템.
Fig. 1. Configuration of optical CDMA based acoustic sensor system using optical fiber sensors.

된 PN 부호를 사용하여 외부광변조기(EOM:External Optical Modulator)에서 광 CDMA 신호로 변환되고, 광 지연기를 거쳐 하나의 칩만큼 지연된다. 광섬유로 음파를 포착하기 위하여 마하젠더 간섭계(MZI: Mach-Zehnder Interferometer)를 이용한 광센서를 사용하는데, 그 구성은 (그림 2)와 같다. 마하젠더형 광섬유 간섭계는 2개의 방향성 결합기로 구성되어 있는데, 첫 번째의 방향성 결합기에서 분기된 광은 각각 다른 광섬유를 거쳐 두 번째 방향성 결합기에서 결합되어 간섭하게 된다. 광센서의 상측 광섬유에 음파가 감지되면 그 압력에 의하여 광섬유의 굴절률과 길이가 변하게 되고, 상하측 광섬유 사이에 광 경로차가 발생하여 출력신호가 변하게 된다. 즉 변화가 발생한 광센서의 출력에 의하여 음파의 세기와 파형을 감지할 수 있다. M개의 광센서가 광 지연기 사이에 연결되어 수신부의 포토 다이오드(PD: Photo Diode)에 접속되어 있으며 각각의 광센서는 서로 다른 광 지연시간이 할당되어 각 광센서별로 다른 PN 부호가 할당된다. 여러 개의 광센서에 의해 음파가 측정되면 해당 광 출력 신호는 하나의 포토 다이오드(PD)에 의해 검출된다. 그리고 PN 부호 발생기에서 생성한 PN 부호가 가변형 시간 지연기에 의해 시간 지연되어 수신부의 아날로그 스위치의 제어신호로 사용함으로써 임의의 광센서에 인가되는 물리량을 측정할 수 있다. M개의 광센서 중에서 원하는 물리량을 검출하기 위하여 해당된 광센서에 입력된 광 CDMA 신호와 동일하게 지연된 신호를 선택하여 아날로그 스위치를 제어한다. 아날로그 스위치에서 제어신호인 수정된 PN 부호가 '1'이면 상측으로 연결되어 가산되고, '0'이면 하측으로 연결되어 감산된다.

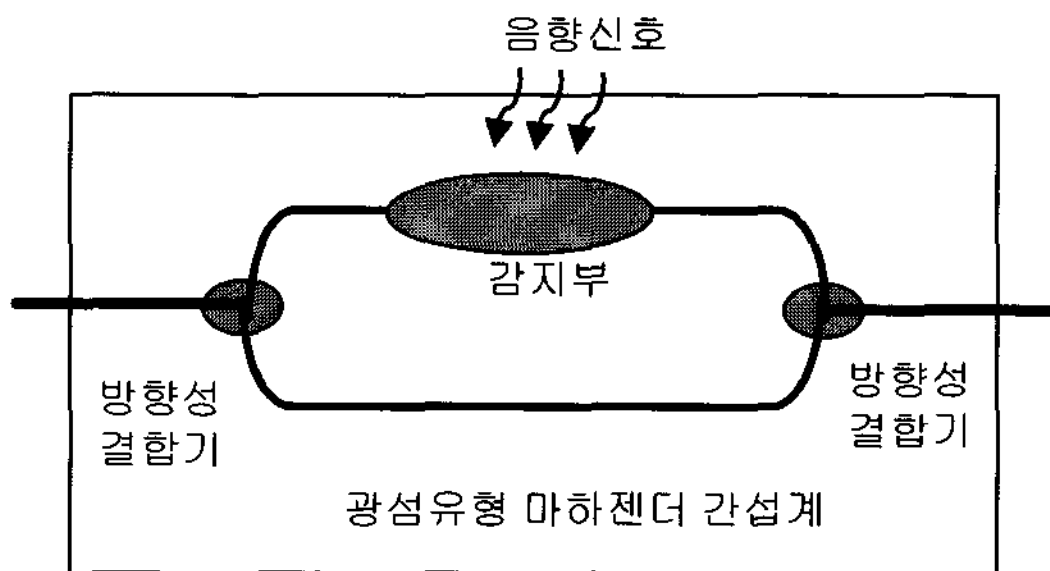


그림 2. 마하젠더 간섭계형 광센서 헤드.
Fig. 2 Optical sensor head using Mach-Zehnder interferometer.

광 지연기와 가변형 시간 지연기의 시간차이가 동일하지 않은 경우에는 아날로그 스위치의 상, 하단의 출력되는 신호의 크기는 동일하기 때문에, 검출되는 신호의 차이는 항상 '0'이 되어 간섭전력이 상쇄된다. 한편 광 지연기와 가변형 시간 지연기의 시간이 동일한 경우 즉 해당 광센서가 동작하는 경우에는 음파에 의해 변화된 출력신호가 아날로그 스위치의 상단에서만 신호가 검출되고, 하단에서는 신호가 없다.

따라서 아날로그 스위치에서 출력되는 신호는 수정된 PN 부호가 '1'인 구간에서 검출된 신호는 해당 광센서에서 측정된 음파신호가 되며, A/D 변환기에서 디지털 신호로 변환되어 프로세서에서 음파의 세기와 파형을 측정하게 된다.

III. 이론적 잡음 특성 분석

광원인 LD (laser diode)에서 출력된 신호는 외부변조기(또는 직접변조)를 통하여 PN 부호로 암호화 된다. 암호화된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$S = P_s \cdot c(\tau_k) \quad , k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서 P_s 는 송신 광 전력의 피크치이고, n 은 PN 부호의 부호장이다. 암호화된 광 신호를 시간지연을 주면 특정부호로 인코딩된다. 이때 각각의 광센서를 통과하는 광신호가 서로 다른 시간지연을 겪게 함으로써 서로 다른 부호로 인코딩 하게 된다. 외부변조기를 통하여 암호화된 신호가 j 번째 광 센서와 광 지연기를 통하여 t_j 의 시간지연이 생긴 후 광 검출기(PD)에 입력되어 검출되는 전류신호는 다음과 같이 인코딩 신호를 지니게 된다.

$$I_{Dj} = \alpha P_s \cdot c(\tau_k + \tau_j) \quad (2)$$

여기서 P_r 은 수신 광 전력의 피크치이고, α 는 포토 다이오드의 반응도이다. 수신 광 전력의 피크치와 송신 광 전력의 피크치와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$P_r = \frac{P_s}{M \cdot L_{loss}} \quad (3)$$

여기서 M 과 L_{loss} 는 각각 접속된 광 센서 수, 광 손실이다.

광 검출기에서 측정된 전류신호는 광 검출기 출력단에 연결된 아날로그 스위치에 인가되는 PN 부호에 의하여 일부는 상측 및 하측으로 신호를 분리한다.

j 번째 광센서를 지나 인코딩된 광신호가 수신부의 아날로그 스위치에서의 CDMA 디코딩 부호가 광센서에서의 CDMA 인코딩 부호와 동일한 경우, 즉, 광 지연기에서 발생한 시간지연과 신호처리장치에서 제어되는 가변형 시간 지연기에서 발생한 시간지연이 동일한 경우, 아날로그 스위치의 상측에서만 신호가 검파된다. 따라서, j 번째 광센서를 통과하여 CDMA 인코딩한 광 CDMA 신호를 아날로그 스위치에서 동일 부호로 제어할 경우 검파된 상하측 아날로그 스위치간의 감산되어 A/D converter로 입력되는 평균 전류신호의 크기는 다음과 같다.

$$i_{sj} = i_1 - i_2 = \alpha P_r \cdot \sum_{k=1}^n c(\tau_k + \tau_j) \cdot c(\tau_k + \tau_j) \\ = \alpha P_r \cdot \sum_{k=1}^n c(\tau_k + \tau_j) \quad (4)$$

따라서 신호 전력성분은 다음과 같다.

$$S = i_{s_j}^2 = \left\{ \alpha P_r \frac{(L+1)}{2L} \right\}^2 \quad (5)$$

한편 수신부의 아날로그 스위치에서의 CDMA 디코딩 부호가 광센서에서의 CDMA 인코딩 부호와 동일하지 않은 경우, 즉, 광센서를 통과하면서 겪은 시간지연과 아날로그 스위치에 인가되는 신호의 시간지연이 다른 경우, 일부신호는 아날로그 스위치의 상측에서 일부 신호는 하측에서 검파하게 된다. 검파된 상,하측 아날로그 스위치간의 감산된 전류신호는 다음과 같다.

$$i_{sj} = i_1 - i_2 = \alpha P_r \cdot \sum_{k=1}^n c(\tau_k + \tau_j) \{ c(\tau_k + \tau_j) \overline{c(\tau_k + \tau_j)} \} \quad (6)$$

$$i_{ij} = i_1 - i_2 = \alpha P_r \sum_{k=1}^n c_i(k) [c_j(k) - \overline{c_j(k)}] \quad (7)$$

PN 부호의 특성상 부호가 인코딩 부호와 디코딩 부호가 서로 다르면 아날로그 스위치의 상측과 하측으로 출

력되어지는 칩의 개수가 항상 같기 때문에 상하측 아날로그 스위치간의 감산된 전류신호는 0이 되어, 광 센서간 간섭 즉 MAI(Multiple Access Interference)가 0이 된다. 따라서 간섭 전력성분은 다음과 같다.

$$I = \sum_{i=1, j \neq i}^M i_{ij}^2 = 0 \quad (8)$$

가산적 잡음의 전력성분은 다음과 같이 주어진다 [6][7].

$$N = N_{RIN} + N_{TH} + N_{PIIN} \quad (9)$$

N_{RIN} , N_{SHOT} , N_{TH} 그리고 N_{PIIN} 은 각각 상대강도잡음, 쇼트 잡음, 열 잡음 그리고 위상에 의해 유기된 강도 잡음이다. 상대강도잡음 N_{RIN} , 쇼트 잡음 N_{SHOT} , 열 잡음 N_{TH} 은 각각 다음과 같이 주어진다 [7][8].

$$N_{RIN} = \frac{\xi_{RIN} i_{s_j}^2}{T_m} \quad (10)$$

$$N_{SHOT} = \frac{2e\alpha i_{s_j}}{T_m} \quad (11)$$

$$N_{TH} = \frac{8k_B T}{R_L T_m} \quad (12)$$

여기서 e , ξ_{RIN} , k_B , T 그리고 T_m 은 각각 전하, 상대강도 잡음의 전력스펙트럼밀도, 볼츠만 상수, 부하저항, 잡음온도 및 광센서의 측정시간이다.

다중경로를 지나온 빛의 위상이 다르게 되어 발생하는 PIIN(phase induced intensity noise)이 발생한다 [9][10]. 각각의 센서에 의한 지연 시간이 광원의 간섭시간보다 큰 경우 N_{PIIN} 은 다음과 같다.

$$N_{piin} = \frac{M(M-1)}{\pi 2 T_m \Delta \nu} \quad (13)$$

여기서 $\Delta \nu$ 는 광원의 선폭이다. 따라서 A/D 변환기 입력단에서 신호 전력대 잡음전력의 비(SNR)은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{S_s}{N} \quad (14)$$

IV. 프로그램에 의한 수치 해석 및 분석

분석한 잡음 전력을 프로그램에 의한 시뮬레이션에 (표 1)의 변수를 사용하여 수치해석을 수행한다.

표 1. 수치해석에 사용한 변수
Table 1 parameters used in numerical simulation

Responsivity of PD	α	0.8A/W
PSD of relative intensity noise	ξ_{RIN}	-152dB/Hz
Load resistance	R_L	1M Ω
Noise temperature	T	300K
Coupling loss of 1:M coupler		10logM [dB]
Fiber loss	L_{loss}	1.5dB
Line width of LD	ΔV	100MHz

(그림 3)은 시스템에서 발생할 수 있는 잡음을 고려하여 센서의 측정시간을 변화시키면서 부착되는 센서의 수에 따른 SNR을 계산한 결과이다. 시뮬레이션 결과 센서의 측정시간이 각각 1초, 0.1초 및 0.01초인 경우 각각 128개, 78개 및 24개 이하의 센서들을 연결할 경우 40 dB 이상의 SNR을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

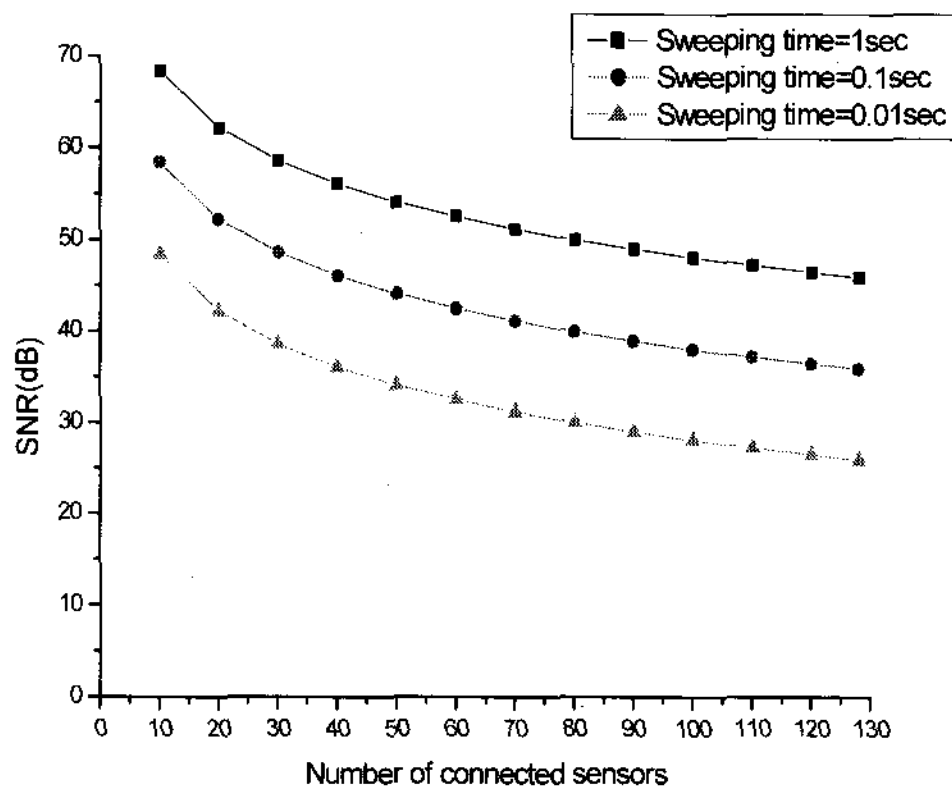


그림 3. 센서 수에 따른 SNR 특성
Fig. 3 relationship between the number of sensors and SNR

(그림 4)는 센서의 측정시간이 0.1초이고 LD의 송신 피크전력이 10dBm일 때, 센서의 수에 따른 각종 잡음전력을 보여 주고 있다. 잡음전력은 상대강도잡음, 쇼트

잡음, 열 잡음 그리고 PIIN 등으로 구성된다. 잡음 전력 중에서 PIIN이 SNR을 지배하는 것을 알 수 있다. PIIN을 감소시키기 위해서는 선폭이 넓은 광원을 사용하거나 측정시간을 증가시켜야 된다.

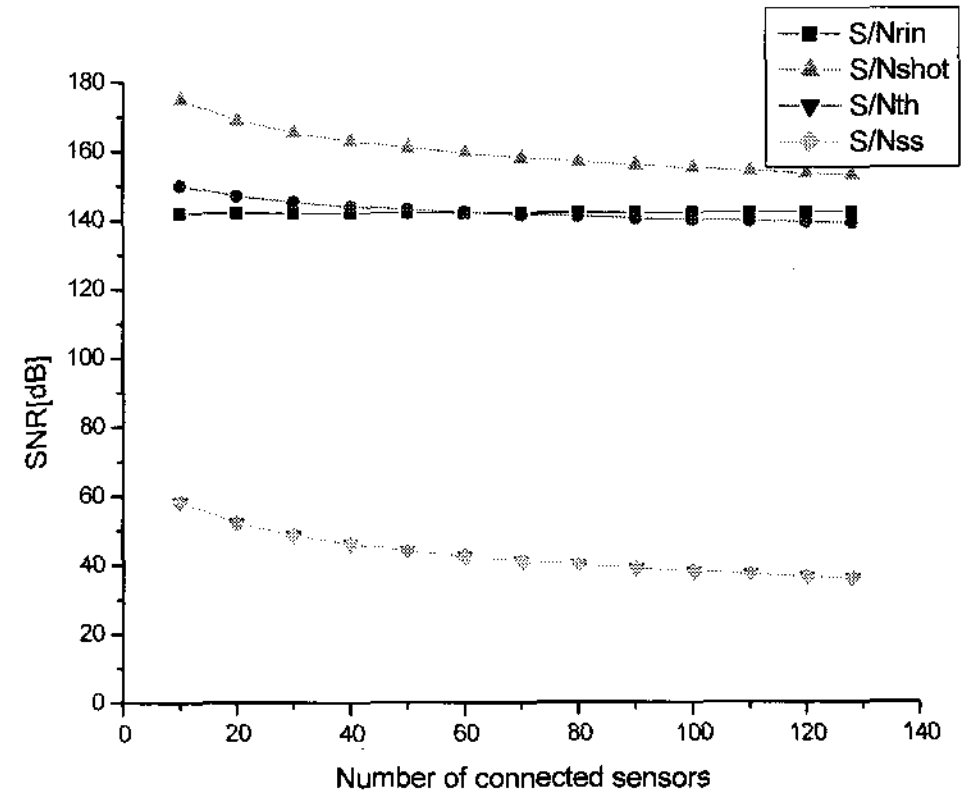


그림 4 센서의 수에 따른 각종잡음전력 (Tm=0.1초, Ps=10dBm)
Figure 4. relationship between the number of sensors and noise powers

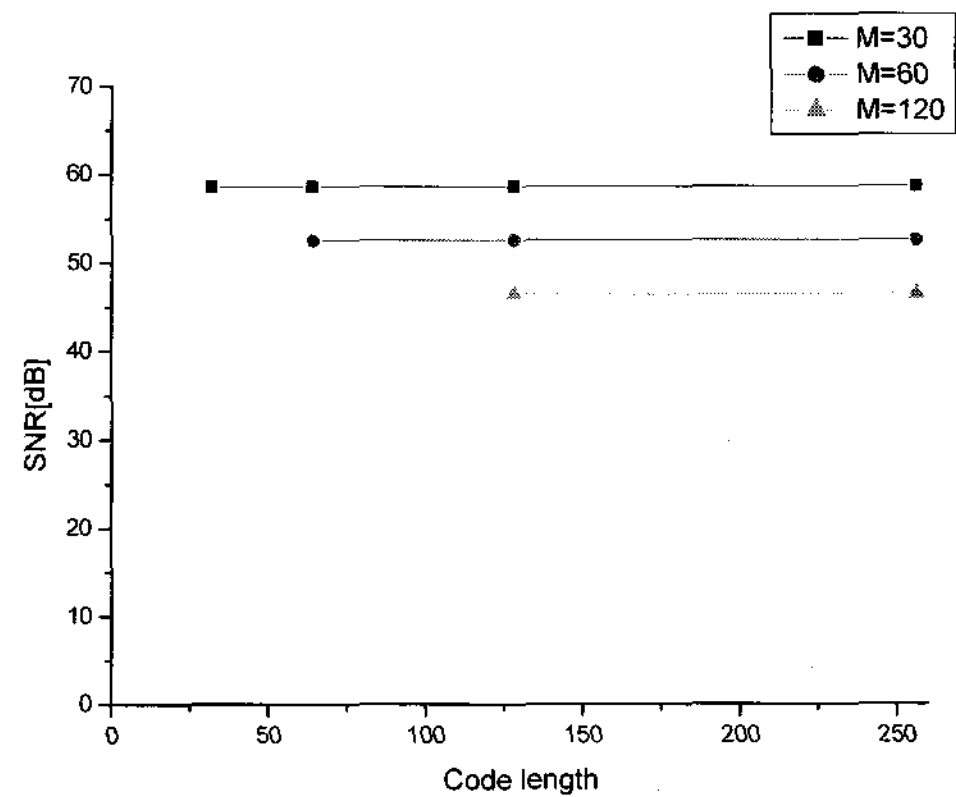


그림 5. 부호장에 대한 SNR (Tm=1초, Ps=10dBm)
Fig. 5 relationship between code length and SNR

(그림 5) 센서의 측정시간이 1초이고 LD의 송신 피크전력이 10dBm일 때, 부호장에 대한 SNR을 보여 주고 있다. 광원의 선폭이 부호장과 센서의 측정 주파수와의 적보다 상대적으로 매우 크기 때문에 PIIN은 부호장에 무관한 특성을 가진다. 잡음 중에서 PIIN이 SNR을 지배하기 때문에 SNR은 부호장에 무관한 것을 알 수 있다.

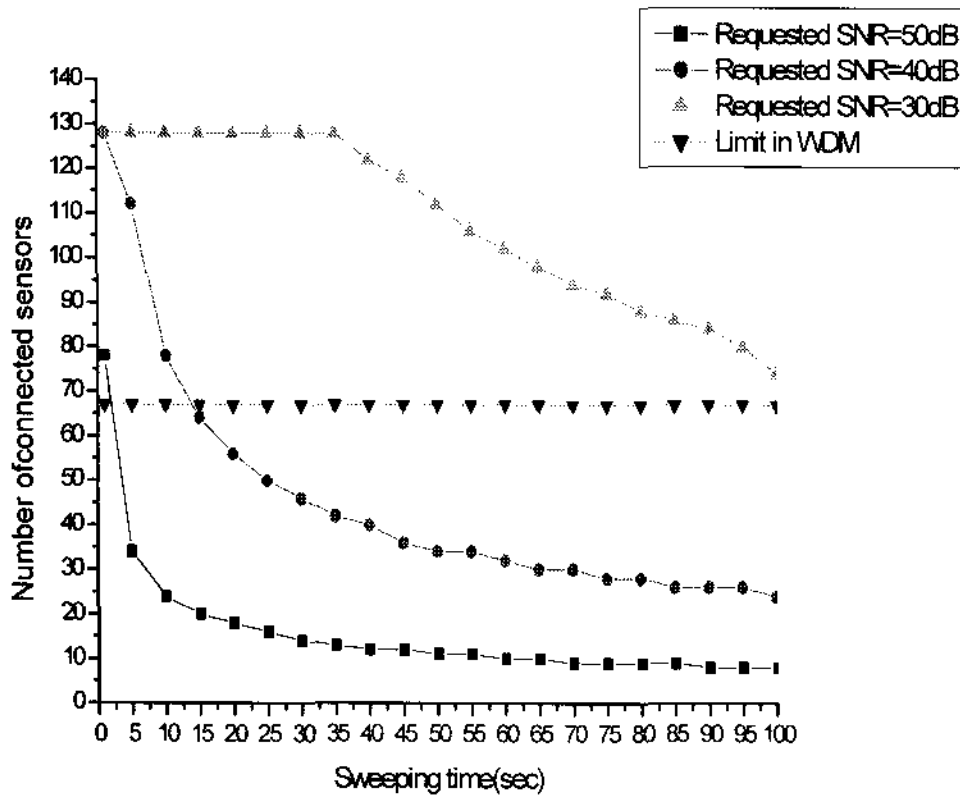


그림 6. 센서의 측정시간에 대한 접속 가능한 광센서의 수량 ($P_s=10\text{dBm}$)

Figure 6 relationship between the number of sensors and the computing time of sensor

(그림 6)은 SNR이 30dB, 40dB 및 50dB일 경우, 센서의 측정시간에 대한 접속 가능한 광센서의 수량을 나타내고 있다.

종래의 WDM 방식을 광센서 네트워크에 적용할 경우 접속 가능한 광센서의 수는 70개 이하가 된다. 제안한 CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템에서 센서의 측정시간을 감소시키면 SNR이 감소하여 접속 가능한 광센서의 수는 감소하게 된다. SNR을 40dB 이상 유지하기 위하여 센서의 측정시간이 각각 1초, 0.1초 및 0.2초일 경우, 접속 가능한 광센서의 수는 각각 128, 78 및 34개가 되는 것을 알 수 있다. CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템에서 센서의 측정시간을 증가 또는 광원의 선폭 조절을 통하여 종래의 WDM 방식을 적용할 경우 보다 특성이 개선되는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

바닷속과 같은 수중에서 1개의 광섬유에 다량의 배열형 광센서를 접속하여 광범위한 영역에서의 원격 측정도 가능한 광 CDMA 방식 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템을 제안하였다. 그리고 제안 시스템에서 잡음특성을 이론적으로 분석하여 컴퓨터 시뮬레이션에

의하여 연결 가능한 광센서의 수 등을 분석하였다. 광 CDMA 기반 광섬유 센서를 이용한 음파탐지 시스템에서 센서의 측정시간을 증가시키면 종래의 WDM 방식을 적용할 경우 보다 많은 100개 이상의 광센서를 접속할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. J. Mlodzianowski, D. Uttamchandani, and B. Culshaw, "Simple fibre-optic multiplexing system using pseudorandom sequence", *Electronics Lett.*, vol. 23, no. 23 pp.1436-1438, 1988.
- [2] A. D. Kersey, A. Dandridge and M. A. Davis, "Code-division multiplexed interferometric array with phase noise reduction and low crosstalk", *OFS-8*, pp.266-269, 1992.
- [3] D. J. Webb, "Optical-fiber sensors: An overview", *MRS Bulletin* pp. 365-369, May, 2002.
- [4] A. Dandridge and A. Kersey, "Multiplexed interferometric fiber sensor arrays", *SPIE vol.1586 Distributed and multiplexed fiber optic sensors*. pp.176-181, 1991.
- [5] 지성훈, 박동빈, 김달우, "광섬유 Fabry-perot 간섭계를 이용한 초음파의 검출", *한국광학회 하계발표대회*, WF-II40, pp.298-299, 2003.
- [6] 박상조, 김봉규, "간섭잡음을 억압한 양극성 수신기와 PN 부호에 의한 광 CDMA 방식을 사용한 센서 네트워크", *한국정보처리학회논문지:정보통신*, 제 14권-C권 pp311-316, 2006. 6.
- [7] S. Kajiya, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Proposal of fiber-optic radio highway networks using CDMA method", *IEICE Trans. Electron.*, vol.79-C, no.3, pp.111-117, Jan. 1996.
- [8] S. Park, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Polarity-reversing type photonic receiving scheme for optical CDMA signal in radio highway", *IEICE Trans. Electron.*, vol.81-C, no.3, pp.462-467, Mar. 1998.
- [9] J. L. Gimlett and N. K. Cheung, "Effects of phase-to-intensity noise conversion by multiple reflections of gigabit-per-second DFB laser transmission system",

IEEE J. of Lightwave Tech., vol.LT-4, no.11,
pp1711-1716, June 1989.

- [10] R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "Phase noise and linewidth in an InGaAsP DFB laser", IEEE J. of Lightwave Tech., vol.LT-7, no.6, pp888-895, Nov. 1986.

저자소개



박 상 조(Sangjo Park)

1983년 서울대학교 제어계측공학과
학사

1985년 서울대학교 대학원 제어계측
공학과 석사

1999년 일본 오사카대학 공학박사

1984년~1991년 삼성전자 종합연구소 과장

1992년~2000년 한국전자통신연구원 선임연구원

2000년~현재 서원대학교 정보통신공학과 교수

2003년~2005년 한국전자통신연구원 초빙책임연구원

2007년 캐나다 University of Victoria 객원교수



김 봉 규(Bong Kyu Kim)

1989년 한양대학교 물리학과(학사)

1992년 한국과학기술원 물리학과
(석사)

1996년 한국과학기술원 물리학과(박사)

1996년~1999년 한국과학기술연구원 Post-doc.

1999년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원

※관심분야: 광무선 액세스 네트워크, 광 CDMA 방식,
광센서 네트워크, 광 가입자 망, 광통신시스템, 광센
서 시스템