

# 다채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템에 관한 연구

## A Study on a Multi-channel Fiber Optic Hydrophone System

김 정 석\*  
(Jeong-suk Kim\*)

\* 국방과학연구소

(접수일자: 2001년 6월 7일; 채택일자: 2001년 8월 13일)

최근 광섬유 하이드로폰 시스템은 차세대의 장거리 탐지용 수동 소나 시스템의 탐지 센서로 각광을 받고 있다. 소나 시스템으로서, 광섬유 하이드로폰 시스템은 수중에 전자부가 없이 다중화 기술을 바탕으로 많은 채널의 하이드로폰을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 다채널 배열 설계, 광-전자부, 하이드로폰 설계, 해상시험을 바탕으로 한 최근의 기술 발전 추세를 기술한다. 또한, 시분할 다중화를 바탕으로 32채널 혹은 그 이상까지 확장 가능한 간섭계형 다채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템 개발에 관하여 기술한다. 이를 위해 12채널의 시분할 다중화 하이드로폰 배열을 제작하여 해상시험을 통해 그 성능을 평가하였다.

**핵심용어:** 다채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템, 하이드로폰 배열, 광-전자부, 시분할 다중화, 해상시험

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

In recent years Fiber optic hydrophone systems have been the focus of much attention in the sonar world. For sonar arrays, a fiber optic approach offers the major benefit of passive multiplexing of large numbers of hydrophones without underwater electronics. This paper describes recent development work covering array construction, opto-electronics development, hydrophone design and sea trials. And the development of an interferometric multi-channel fiber optic hydrophone system which uses time division multiplexing capable of driving in excess of 32 channel is described. For this, a 12 channel time division multiplexing array has been constructed, and the performance of this system is demonstrated by sea trial.

**Keywords:** Multi-channel fiber optic hydrophone system, Hydrophone array, Opto-electronics, TDM, Sea trial

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5,6)

### 1. 서론

수중에서 조기에 음향 신호를 탐지하기 위한 광섬유 하이드로폰 시스템의 개발은 1980년대 초부터 연구되기 시작했으나, 1990년대 중반까지도 이 기술은 실험실 수준에서 입증되었을 뿐, 실제 환경에서 그 성능을 발휘할 수 있는 시스템은 개발되지 못했었다[1]. 그러나, 최근 5년 동안 광섬유 하이드로폰 시스템에 적용될 수 있는 새로운 기술들의 개발, 입증과 광통신 산업의 급속한 발전으로 실제 대규모 시스템에 적용될 수 있는 광학 소

책임저자: 김정석 (caekim@add.re.kr)  
645-600 경남 진해시 진해우체국 사서함 18호  
국방과학연구소 수중음향연구소  
(전화: 055-540-6183; 팩스: 055-542-3737)

자의 신뢰성과 성능이 크게 향상되어 실제 환경에서 안정적인 성능을 발휘할 수 있는 광섬유 하이드로폰 시스템이 개발되기에 이르렀다. 따라서, 현재는 광섬유 하이드로폰 시스템이 기존의 압전 세라믹을 이용한 하이드로폰과 견줄만한 성능과 신뢰성을 가지게 되어 미래의 소나 시스템에 적용 가능하게 되었다.

현재까지 압전 소재를 이용한 전자-음향 (Electro-acoustic) 하이드로폰 기술은 오랜 기간에 걸쳐 발전되었고, 뛰어난 성능을 가지고 있다. 그러나, 이러한 방법은 대규모 다채널 배열의 경우 신호선으로 사용되는 케이블 내의 동선 수가 급격하게 늘어나게 되는 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해 다중화 (Multiplexing) 기술이 도입되지만, 다중화를 위한 별도의 전원이 필요하고

전송 용량의 제한으로 채널 수 증가에 따른 동선의 증가는 피할 수 없으며, 장거리 신호 전송시의 신호 감쇄에 따른 전치증폭기와 증계의 필요 등 근본적인 문제는 해결되지 않고 있다. 이에 반해 광섬유 하이드로폰은 광케이블 내에 수용할 수 있는 광섬유 가닥 수의 한도 내에서 충분히 많은 수의 채널을 구성하여 다중화할 수 있고, 장거리 전송에도 이점이 있는 등 대규모 다채널 배열에 적용할 수 있고, 수중에서 전자부를 사용하지 않음으로 전자기 간섭도 없으며, 장거리 탐지에 적용할 수 있는 고감도의 감지부를 구성할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있어서 현재 광섬유 하이드로폰 시스템은 차세대 수동 소나로서 각광을 받고 있는데 해저 고정형, 예인형, 선체 부착형, 이동식 해저 설치형 등 적용분야도 다양하다[2].

이러한 광섬유 하이드로폰을 개발하기 위해 지난 20여 년 동안 다양한 형태의 광섬유 하이드로폰 구성안이 개발되었는데, 광섬유를 전파하는 광의 진폭, 위상, 파장, 편광 등의 변화를 이용하는 것이다. 그러나 이들 중에서 광 위상의 측정을 기본으로 하는 간섭계 기술이 가장 감도가 높고 실제 센서 시스템에 적용 가능한 것으로 밝혀져 현재 대부분의 광섬유 하이드로폰 시스템에 적용되고 있다[3].

간섭계 시스템에 있어서 하이드로폰은 대개 맨드릴에 광섬유 (보통 10 - 100 m)가 감겨져 있고, 물딩 등으로 보호된다. 음향 신호가 광섬유 주위의 압력장을 변화시키게 되면 이 압력장의 변화가 광섬유를 변형시키고 광섬유에 변형률을 발생시킨다. 이 변형률이 광섬유의 물리적인 길이와 굴절률의 변화를 발생시키고, 광탄성 효과를 유발시켜서 광섬유를 지나는 광의 위상변화를 가져온다[4]. 이 위상 변화는 음향 신호에 비례하게 되는데, 간섭계와 적절한 복조기를 통해 음향 신호로 복원될 수 있다[5].

광섬유 하이드로폰 시스템의 개발은 1980년대 초에 미

국의 NRL (Naval Research Laboratory), 영국의 DERA (Defense Evaluation and Research Agency)의 지원을 받은 Plessey 등 많은 연구소에서 시작되어, 1983년 시험적으로 예인형 광섬유 하이드로폰 시스템의 개발이 NRL에 의해 수행되었고, 해저 설치용 시스템은 1986년에 Plessey에서 수행되었다. 1990년까지 광섬유 하이드로폰 배열은 48채널까지 개발되었는데, 이 시스템의 잠음준위는 실험실에서 해상상태 0 (Deep Sea Satate 0)보다 10 dB 낮은 수준의 것이었다[6]. 그러나, 광섬유 하이드로폰 시스템은 여전히 비싸고, 신뢰성이 떨어져서 실제 환경에 적용되기는 힘든 실정이었다. 최근에는 1997년에 미국 NRL에서 TDM (Time Division Multiplexing)과 WDM (Wavelength Division Multiplexing)방식을 혼합하여 64채널 배열 시스템[7]을 개발하였고, 영국 DERA에서 시분할 다중화 방식의 32채널 배열 시스템[8]을 개발하여 해상시험하는 등 채널 수의 증가가 이루어지고 있으나, 각국에서는 여전히 실제 해상 및 해저 환경에 적용할 수 있는 신뢰성 있는 시스템을 개발하기 위해 노력하고 있다.

국내에서는 광섬유 하이드로폰 시스템 개발과 관련된 연구가 전무한 상태에서 기초 연구가 1990년대부터 진행되고 있는데, 본 논문에서는 12 채널의 TDM방식의 광섬유 하이드로폰 배열 시스템의 개발 및 해상 시험 결과에 대해 보고한다.

## II. 12채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템

### 2.1. 배열 구성

앞 장에서 설명한 바와 같이 광섬유 하이드로폰 시스템은 대규모 다채널 배열에 적용할 수 있는데, 한 개의 광원을 사용하여 최대한 채널 수를 늘리기 위해 각 광학 소자와 조립 공정의 손실을 정량화하고 제어[9]하여, 12채널

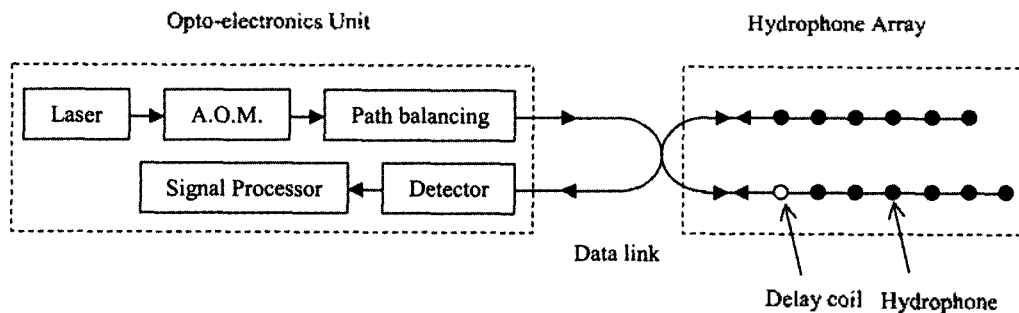


그림 1. 광섬유 하이드로폰 배열 시스템 구조  
Fig. 1. Fiber optic hydrophone array system architecture.

의 배열 시스템을 그림 1과 같이 구성하였으며, 이러한 구성 기술은 광증폭기를 사용할 경우 32채널 혹은 그 이상까지 확장할 수 있다.

본 배열 시스템은 육상에 있는 광-전자부 (Opto-electronics Unit), 신호 전송 광케이블 (Data link)과 바다에 투하되어 해저에 설치되거나 수직 선배열의 형태로 음향신호를 감지하는 하이드로폰 배열 (Hydrophone Array)로 구성된다.

신호 전송 케이블 내의 광섬유 중에서 2가닥의 광섬유를 이용하여 광신호를 송/수신하고, 하이드로폰 배열 내에서는 광펄스의 듀티 효율을 증대시키고 채널 수 확장을 위한 펄스 끼워넣기[10]를 위해 2개의 브랜치를 구성하여, 각각 6채널씩 모두 12채널의 광섬유 하이드로폰 배열을 시분할 다중화 방식[11]을 이용하여 구성하였다. 각 채널은 기존 광섬유를 육상에 보상 간섭계 (path balancing)의 형태로 두는 비대칭 Michelson 간섭계를 이용하는 반사식 하이드로폰이 적용되었다[9].

그림 2는 본 연구에서 구성한 시분할 다중화 방식의 개념을 나타낸다.

각 브랜치마다 2개의 광 펄스가 브랜치로 입력될 때, 8개의 광 펄스가 출력되어 하이드로폰 배열 전체의 출력 펄스는 16개이다. 이 중 12개만이 위상차의 형태로 음향 신호 정보를 포함하고 있는 간섭신호이다.

## 2.2. 광-전자부

광-전자부는 광원, 연속적인 광신호를 펄스 신호로 바꾸어 주는 음향-광 변환기 (A.O.M.), 하이드로폰 배열의 각 채널의 길이 보상을 위한 보상 간섭계, 광섬유의 길이를 신축시켜서 음향 신호의 복원을 위한 신호광의 위상을 변조시키는 위상변조기, 하이드로폰 배열로부터 수신되는 광신호를 검출하기 위한 광검출기, 신호처리기 등으로

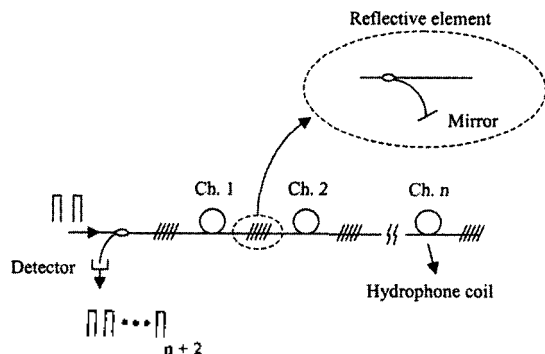


그림 2. 반사식 배열의 시분할 다중화 방식의 개념  
Fig. 2. Time division multiplexing scheme (reflectometric array).

로 구성된다. 본 연구에서는 1310 nm의 Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하였는데, 최대 출력은 약 100 mW정도이다. 광원에서 100 mW의 출력을 나타내는 광신호는 음향-광변환기, 보상간섭계 등의 광-전자부를 거치면서, 약 13 dB정도 손실이 발생되게 되어 하이드로폰 배열에 입사되는 광량은 약 5 mW정도가 된다. 하이드로폰 배열의 채널 수를 제한하는 가장 큰 원인은 바로 광출력인데, 1550 nm 파장의 광원을 이용하고, 광증폭 기술을 적용하면 최대 광출력이 하이드로폰 배열 앞단에서 약 200 mW 이상이 되어 하나의 광원으로 32채널 이상의 배열을 구성할 수 있을 것이다[12].

음향 신호에 의한 위상 변화를 복원하기 위한 신호처리 기법으로 Synthetic Heterodyne 기법[13]을 사용하였다. 이 기법은 간섭계 한 통로의 위상을 변조시킨 다음 위상 변조 신호와 주파수가 같고 동기된 신호로 간섭계 출력을 진폭 변조하여 위상 변조 신호 주파수의 체배 주파수에서 변화하는 위상을 검출하여 원하는 신호를 얻어내는 신호 처리 기법인데, 자세한 내용은 생략한다[10].

## 2.3. 하이드로폰

기본적인 광섬유 하이드로폰의 형태는 서론에서 설명한 바와 같이 맨드렐을 이용한 형태로서 지난 20여 년간 크게 변화하지 않았는데, 기본 개념은 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는 바와 같이 광섬유가 얇은 중공형 맨드렐에 감겨있고, 폴리아우레탄이나 에폭시 등과 같은 재료로 보호된다. 중간에 있는 튜브는 금속이나 수지 재료로 제작하여 기존 광섬유가 필요할 경우 기존 광섬유가 변형되지 않도록 하고, 외부의 감지 광섬유를 감는 맨드렐은 최대 운용 수심에서 안정적으로 작동되면서 고감도를 가지도록 설계되어야 한다.

광섬유 하이드로폰은 입력 단위 음압에 대한 출력 전압

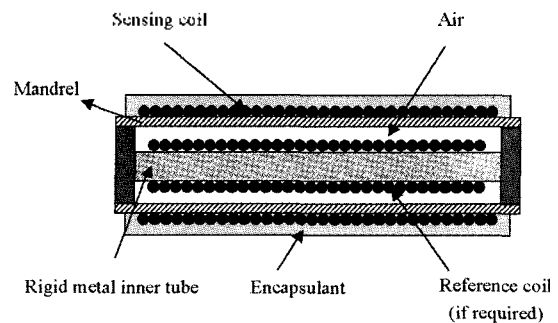


그림 3. 일반적인 맨드렐형 광섬유 하이드로폰  
Fig. 3. Typical mandrel fiber optic hydrophone design.

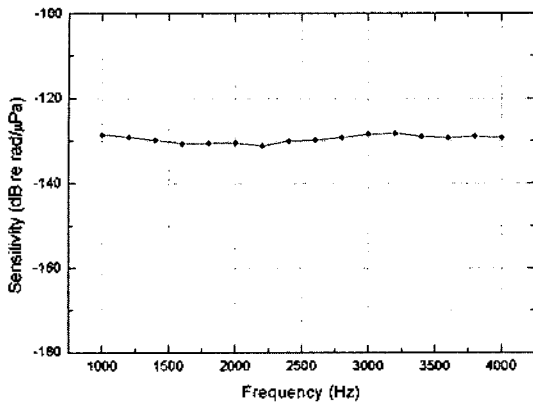


그림 4. 광섬유 하이드로폰의 감도 특성  
Fig. 4. Sensitivity characteristic of fiber optic hydrophone.

으로 감도를 나타내는 압전 하이드로폰과 달리 입력 단위 음압에 대한 신호광의 위상 변화 형태로 그 성능을 나타낸다. 광섬유 하이드로폰 시스템의 성능을 좌우하는 최소 감지 음압을 결정하는 중요한 요소로는 자체 잡음 준위와 하이드로폰의 감도를 들 수 있다. 배열의 채널 수가 증가할수록 광학 소자들의 광학적 잡음이 증가하여 자체 잡음 준위가 높아지게 된다. 따라서, 가능한 하이드로폰의 감도를 증가시켜야 한다. 하이드로폰의 감도는 권선하는 광섬유의 길이와 맨드릴의 구조에 의해서 결정되는데, 광섬유의 길이는 배열 구조에 따라 제한되게 된다. 따라서, 맨드릴 및 몰딩 재질의 구조와 특성에 따라 감도가 결정되는데, 고감도의 하이드로폰을 설계하기 위해 FEM 등을 이용한 해석 기법[14-16]과 실험 기법[17]이 동시에 연구되어져 왔다. 본 연구에서 설계한 하이드로폰은 약 -130 dB re rad/μPa의 감도 특성을 가지는데, 각 하이드로폰은 외경 42 mm의 MC-Nylon 재질의 맨드릴을 이용하였고, 29 m의 광섬유를 권선하였다. 비교적 짧은 광섬유를 이용해서도 비교적 높은 수준의 감도 특성을 보이고 있다. (그림 4)

그림 4의 감도 실험 결과는 음향 수조에서 기준 음원을 이용하여 측정된 결과로서 해상시험에서도 같은 결과를 얻었다[18].

이러한 형태의 하이드로폰은 미국 NRL, 영국 DERA 등 광섬유 하이드로폰을 연구하는 많은 나라에서 적용하고 있는데, 외국의 경우 맨드릴의 재질 및 구조, 운용 중심과 권선하는 광섬유의 길이에 따라 -120 ~ -140 dB re rad/μPa의 성능을 나타낸다.

#### 2.4. 시스템 성능

지난 20여년간 개발된 광섬유 하이드로폰 시스템의 가



그림 5. 12 채널 광섬유 하이드로폰 배열  
Fig. 5. 12 element Fiber optic hydrophone array.

장 큰 문제점은 실험실에서 높은 성능을 발휘하는 시스템이 수중 내지 해저의 실제 환경에서는 안정적인 성능을 발휘하지 못하는 것이었다. 그렇지만, 최근 5년 동안 각국에서 실험실뿐 아니라 실제 환경에서 안정적인 성능을 발휘하는 시스템을 개발하고 해상시험 결과를 발표하고 있다. 본 연구에서는 확장 가능한 시분할 다중화 방식의 12 채널 광섬유 하이드로폰 시스템을 개발하여 실험실 및 해상에서의 실험을 통해 그 성능을 평가하였다.

시스템을 제작한 후 실험실 및 음향 수조, 무향실 등에서 음향 수신 감도, 동적 범위, 시스템 자체 소음 준위 등을 측정하고, 3일 동안의 해상시험을 거쳐 시스템의 신뢰성을 검토하였으며, 수중에 수직 선배열의 형태로 하이드로폰 배열을 설치하고, 기준 음원 (Sound Trek II) 으로부터 방사되는 음향 신호를 수신토록 하여 그 특성을 평가하였다.

그림 5는 실제 제작된 하이드로폰 배열의 해상 시험 장면을 나타내고 있다.

실험실 및 해상에서의 시험 결과, 신호처리부 잡음 준위는 1 kHz에서 약  $8 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고, 시스템 잡음 준위는  $-85 \text{ dB re rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이며 음압단위로 표시할 때 45 dB re  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로서 해상상태 0 (DSS0) 수준이며, 동적 범위는 역시 1 kHz에서 약 80 dB정도로서 뛰어난 성능을 나타내고 있다.

### III. 결론 및 전망

본 연구를 통하여 장거리 탐지를 위한 차세대 소나 시스템으로 주목받고 있는 다채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템이 개발되었는데, 제한된 광원의 광량을 최대한

활용할 수 있는 배열 설계기술을 바탕으로 시분할 다중화 방식을 이용한 12채널의 하이드로폰 배열을 구성하였고, 안정적인 신호의 발생 및 신호처리를 위한 광-전자부를 개발하였다. 또한 실제 수중 및 해저에서의 운용성 및 신뢰성을 검증하기 위해 해상시험을 수행하여 하이드로폰 배열의 신뢰성을 입증하였다.

본 연구에서 개발된 다채널 광섬유 하이드로폰 배열 시스템은 광증폭기를 사용할 경우 32채널 혹은 그 이상으로 확장이 가능하며, 잠수함 등의 조기 탐지를 위한 대규모의 수중 탐지 시스템의 수동 소나로 적용할 수 있을 것이다.

그러나, 본 연구를 실제 시스템에 적용을 하기 위해서는 채널 확장에 따른 광학적 자체 잡음의 저감 기술, 운용 수심에서의 하이드로폰의 수신 감도 향상 기술, 25년 이상 장기 사용할 수 있는 강건 설계 기술, 생산 공정의 표준화 등의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

1. P. Nash, "Review of interferometric optical fiber hydrophone technology," *IEEE Proc. Radar, Sonar & Nav.*, **143**(3), pp. 204-209, 1996.
2. A. M. Yurek, "Status of fiber optic acoustic sensing," *Optical Fiber Sensors 8*, pp. 338-341, 1992.
3. A. Dandridge and G. B. Cogdell, "Fiber optic sensors for navy applications," *IEEE LCS*, pp. 81-89, 1991.
4. G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Applied optics*, **18**(9), pp. 1445-1448, 1979.
5. A. Dandridge, A. B. Tveten and T. G. Giallorenzi, "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier," *IEEE J. Q.E.*, **QE(18)**, pp. 1647, 1982.
6. A. Dandridge, "The development of fiber optic sensor systems," *Optical Fiber Sensors 10*, pp. 154-161, 1994.
7. A. R. Davis, C. K. Kirdendall, A. Dandridge and A. D. Kersey, "64 Channel all optical deployable acoustic array," *Optical Fiber Sensors 12*, pp. 616-619, 1997.
8. P. Nash and G. A. Cranch, "Multi-channel optical hydrophone array with time and wavelength division multiplexing," *Optical Fiber Sensors 13*, pp. 304-307, 1999.

9. 김정석, 윤형규, 남성현, "Michelson 간섭계를 이용한 광섬유 하이드로폰의 음향감지부 설계," 국방과학연구소 기술보고서 (NSDC-517-991004), 1999.
10. 남성현, 양창섭, "TDM 방식의 2채널 광섬유 하이드로폰 배열 특성 연구," 국방과학연구소 기술보고서 (NWS-517-971574), 1997.
11. A. D. Kersey, "Multiplexed fiber optic sensors," *Proc. SPIE, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II* 1797, pp. 161-185, 1992.
12. A. D. Kersey, A. Dandridge, A. R. Davis and C. K. Kirdendall, "64-element time-division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry," *OFC 96 Technical Digest 2*, pp. 270-271, 1996.
13. J. H. Cole, B. A. Danver and J. A. Bucaro, "Synthetic-heterodyne interferometric demodulation," *IEEE J. Q.E.*, **QE(18)**, pp. 694-697, 1982.
14. P. Nash and A. B. Gallaher and D. J. W. Hardie, "Finite element modeling of optical fiber hydrophones", *Proc. I.O.A.*, **17**(3), pp. 164-172, 1995.
15. J. I. Im and Y. R. Roh, "A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone with a concentric composite mandrel including a loaming layer," *J. Acoust. Soc. Am.*, **106**(3), pp. 1363-1368, 1999.
16. 김정석, 윤형규, 설재수, 남성현, "중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석," 한국소음진동공학회지 **9**(3), pp. 565-569, 1999.
17. 김정석, 윤형규, 설재수, "실험을 통한 소형 고감도 광섬유 하이드로폰의 감지성능 연구," 한국소음진동공학회지 **9**(6), pp. 1152-1156, 1999.
18. 윤형규, 김정석, 남성현, "광섬유 하이드로폰 배열 해상시험 보고서," 국방과학연구소 기술보고서(NSDC-317-000222), 2000.

### 저자 약력

● 김정석 (Jeong-suk Kim)



1995년 2월: 경북대학교 기계공학과 졸업 (공학 학사)  
 1997년 2월: 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업 (공학 석사)  
 1997년 2월~ 현재: 국방과학연구소 연구원  
 ※ 주관심 분야: 수중 음향 센서, 광섬유 하이드로폰