

# Design and Initial Clinical Test Results of a Simplified Cochlear Implant System

이중재, 안순관, 박세익, 김성준

전기컴퓨터 공학부, 초미세생체전자시스템 연구센터, 서울대학교

## 초록

A simplified cochlear implant system would be appropriate for widespread use in developing countries. Such a system has been developed as an academia-industrial project. The system implements 8 channel Continuous Interleaved Sampling (CIS) strategy. A generic Digital Signal Processing (DSP) chip is used for the processing with FFT filtering. Data derived from the processing are transmitted through an inductive link using Pulse Width Modulation (PWM) encoding and Amplitude Shift Keying (ASK) modulation. The same link is used in the reverse direction for backward telemetry of electrode and system information. A custom receiver-stimulator chip has been developed that demodulates incoming data using pulse counting and produces charge balanced biphasic pulses at 1000 pulses/s/channel. This chip is encased in a titanium package. An intra-cochlear electrode array with 16 ball-shaped stimulating contacts was also fabricated.

Speech perception tests with Ineraid patients to evaluate the effectiveness of the system were performed at the Center for Auditory Prosthesis Research at the Research Triangle Institute (RTI) in the United States.

## 1. 서론

인공 와우(Cochlear implant)란 선천적 혹은 후천적 장애에 의해 청력을 상실한 환자의 잔존 청각 신경 세포를 전기적으로 자극함으로써, 손실된 청각각 기능을 되살려주는 신경 보철 장치의 하나이다.

본 연구에서는 이와 같은 인공 와우 시스템을 산학 연구를 통해 개발하고, 외부에서 연결 가능한 인공 와우 전극을 체내에 이식하고 있는 환자들을 대상으로 개발된 인공 와우 시스템의 유효성을 검증하였다.

## 2. 인공 와우 시스템 개발

개발된 인공 와우 시스템은 외부 소리 신호를 받아들여 주파수 분석을 행하고, 이 결과에 따라 전기 자극이 가해질 수 있도록 데이터를 생성하는 음성 처리기, 음성 처리기의 데이터를 받아들여 자극 전류를 생성해내는 이식형 자극기, 그리고 이 둘간의 전력 및 데이터 전송을 담당하는 무선 통신부로 구성된다(그림 1).

### 2-1. 음성 처리기

개발된 음성 처리기는 Continuous Interleaved Sampling(CIS) 음성 처리 기법을 구현하도록 개발되었다 [1, 2]. Analog pre-processor 에서 HPF 와 BPF 를 통해 음성 신호의 주파수 영역에 맞게 filtering 되고, AGC 나 sensitivity control 을 위한 gain stage 를 통과한다. 통과된 신호는 DSP chip 으로 전달 되고, FFT 를 거쳐 8 개의 주파수 영역별 에너지에 맞게 연산된 후 각 채널별로 적합한 크기의 자극을 생성할 신호를 만든다. (그림 1) [2]

### 2-2. 무선 통신

피부를 사이에 두고 코일을 위치시켜 Inductive coupling을 통해 무선 에너지 및 데이터 전송이 가능하도록 구현하였다. [3] 데이터 전송은 체외에서 체내로 처리된 음성 정보를 전달하는 정방향 통신뿐만 아니라 체내에서 체외로도 시스템 상태나 전극의 임피던스 정보를 전달하는 역방향 통신을 할 수 있도록 구성하였다. 캐리어로는 2.5MHz를 사용하였고, Forward telemetry의 신호변조방법으로는 내부회로의 복원 회로 구조를 간단히 하기 위해 ASK방식의 PWM을 사용하였다. 구성된 Inductive link를 통해 내부이식회로에는 약 12V의 전원이 생성되며 125kbps로 데이터가 전송된다. PWM의 일정한 주기의 rising edge를 이용해 내부회로에 CLK이 복원되므로, 내부회로는 부가적인 CLK 생성회로나 동기회로를 필요로 하지 않는다. 데이터 복원회로에는 피부 두께의 변화에 따라 에러가 발생하지 않도록 Pulse counting 방식을 이용하였다. 구현된 통신 시스템은 피부 두께 13mm까지 Bit Error Rate  $10^{-6}$ 이하로 데이터 수신이 가능하다. 역방향 통신 역시 정방향 통신과 동일한 inductive link를 통해 이뤄지며 신호변조방법으로는 LSK (Load Shift Keying)방식을 사용하였다. [4]

### 2-3. 이식형 자극기

이식형 자극기는 크게 코일부분과 Hermetic sealing 된 Ti 패키지 내의 ASIC chip 및 부가 회로, 그리고 전극 부분으로 나뉜다. 코일을 통해 수신된 신호로부터 데이터를 복원하고 자극 전류를 생성하기 위해 ASIC chip 을 설계하였다. 0.8um HV CMOS 공정을 이용하여 설계한 3.5mm X 3.5mm 크기의 chip 은 16 개의 전극에 7.3uA step 으로 최대 1.86mA 를 CIS 방식으로 전달할 수 있다. 전류 자극은 전기화학적으로 가역적인 반응이 일어나 안전하도록 balanced biphasic pulse 를 생성할 수 있도록 구성하였다. 또한 어떤 경우에도 DC current 의 발생을 막기 위해 blocking capacitor 를 사용하여 안전성을 확보하였다. 전극에 전류가 공급되면 전극의 상태에 따라 다른 전압이 유기되는데 이를 체외에서 확인하기 위해 이 전압을 sampling 하여 역방향 통신을 통해 외부로 전송할 수 있도록 하였다. [5]

## 3. 시스템 유효성 검증 실험

개발된 인공 와우 시스템의 유효성을 검증하기 위해, 체외에서 직접 연결 가능한 자극 전극이 이식되어 있는 4 명의 환자를 대상으로, 영문으로 녹음된 자음, 문장(CUNY sentence) 및 단음절 단어(NU6 word)에 대한 인지도를 측정하였다.

테스트용 음성 신호를 마이크로폰을 대신하여 직접 음성 처리기에 인가하였고, 자극기를 통해 발생한 전기 자극이 환자의 전극을 통해 환자의 청신경 세포를 자극하도록 설정하였다. 각 테스트 신호에 대해, 잡음이 없는 상태, 신호대 잡음비 -10dB, -5dB 의 조건하에 실험을 진행하였고, 각각에 대한 평균 적중도 및 표준 편차를 산출하였다. 대조군으로서 실험이 진행된 RTI CAPR 의 표준 인공 와우 시스템이 사용되었다.

#### 4. 결과

개발된 시스템(그림 2)에 음성 신호를 인가하였을 때 발생된 자극 파형을 관찰하였다. 관찰 결과, 음성 신호(그림 3, Top trace)에 대해 설계대로 CIS 자극 파형이 성공적으로 발생함을 확인할 수 있었다(그림 3, bottom 3 traces).

환자를 대상으로 한 음성 인지도 실험 결과, 개발된 시스템은 대조군인 표준 시스템과 대등한 결과를 보였으며, 가장 성적이 좋은 환자에 대해서는 최고 99%의 높은 문장 인지도를 보였다. 실생활 환경과 유사한 잡음 하에서는 대조군에 비해 높은 성적을 보였으며, 단음절 단어 인지도면에서는 대조군에 비해 조금 낮은 성적을 보였다. (그림 4)

#### 5. 결론

산학 협력 과제로 난청 혹은 전농인 환자의 청각각을 회복시키기 위한 인공 와우 시스템을 개발하고, 환자를 대상으로 한 시스템의 유효성을 검증하였다. 개발된 시스템은 대조군과 동등한 성적을 보였으며, 실제 생활 환경에 가까운 잡음하에서는 더 우수한 성능을 보였다.

#### Acknowledgment

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원(과제번호 R11-2000-075-01001-0)을 받는 서울대 초미세생체전자시스템연구센터 및 ㈜뉴로바이오시스템의 산학 협력으로 수행되었다. 시스템 유효성 검증을 위한 환자 실험은 CAPR(Center for Auditory Research), RTI International, USA 와의 협력으로 수행되었다. 시스템 개발 초기부터 많은 조언과 지원을 아끼지 않은 CAPR의 B. S. Wilson, D. T. Lawson, 그리고 실험에 참여해 준 피험자들에게 감사 드린다.

#### 참고문헌

- [1] B. S. Wilson, C. C. Finley, D. T. Lawson, R. D. Wolford, D. K. Eddington, and W. M. Rabinowitz, "Better speech recognition with cochlear implants," *Nature*, vol. 352, pp.236-238, July 18, 1991.
- [2] S. K. An, S. I. Park, S. B. Jun, C. J. Lee, K. M. Byun, J. H. Sung, B. S. Wilson, S. J. Rebscher, S. H. Oh, and S. J. Kim, "Design for a simplified cochlear implant system," *IEEE Tran. Biomed. Eng.*, Vol. 54, no. 6, pp.973-982, June 2007.
- [3] Z. Hamici, R. Itti, and J. Champier, "A high-efficiency power and data transmission system for biomedical implanted electronics devices," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, no.2, pp.192-201, 1996.
- [4] Z. Tang, B. Smith, J. H. Schild, and P. H. Peckham, "Data transmission from an implantable biotelemetry by load-shift keying using circuit configuration modulator," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.42, no.5, pp.524-528, May 1995.
- [5] 이중재, 안순관, 송종근, 김성준, "A body implantable stimulator IC for neural prosthesis," 제 14 회 반도체학술대회, 제주, 2007년 2월

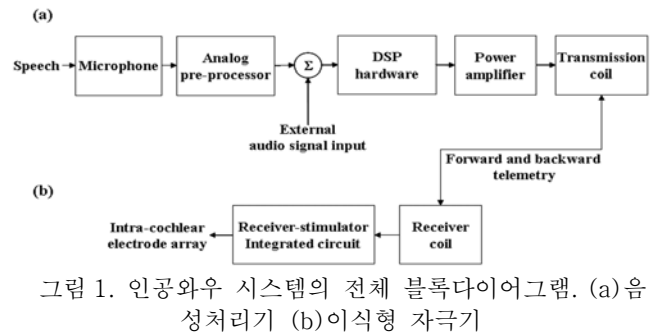


그림 1. 인공와우 시스템의 전체 블록다이어그램. (a)음성처리기 (b)이식형 자극기

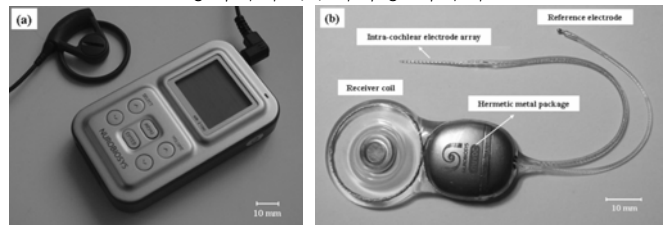


그림 2. (a) 음성처리기 (b)이식형 자극기 사진

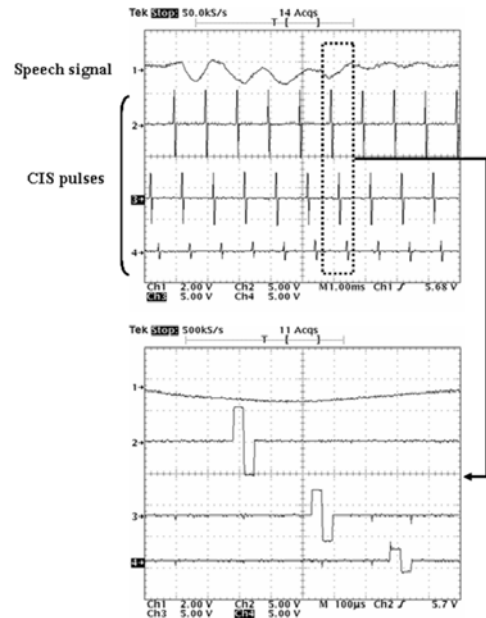


그림 3. 음성신호 입력(Trace1)에 따른 음성 신호처리 결과 관측된 전류 파형들 (Trace 2,3,4)

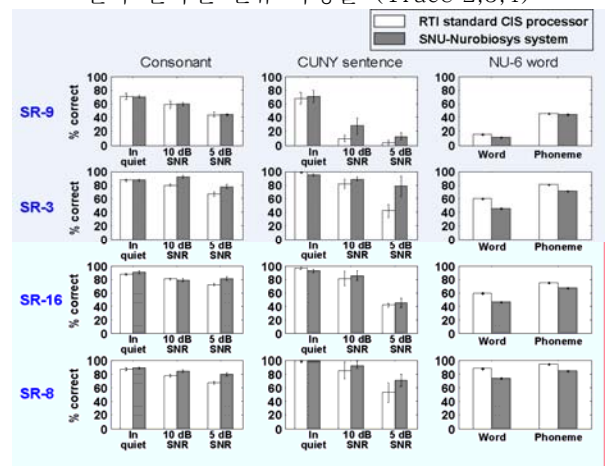


그림 4. RTI에서 4명의 환자를 대상으로 한 어음인지도 테스트 결과