



# 웨어러블 스마트 디바이스 구현을 위한 집적 회로 기술

## I. 서론

올해 1월 19일, 구글은 Google Glass Explorer Program을 중단한다고 발표했다. 물론 Glass의 개발과 개선은 Google 내부적으로 계속될 것이고 언젠가 다시 돌아올 것을 기약했지만, 적어도 지금 현재의 디바이스로는 상용 제품으로서 시장에서 성공하는데 심각한 한계가 있다고 판단한 것으로 보인다. 그럼 현재 Google Glass 디바이스가 가진 어떤 문제들로 인해 이러한 결론에 도달하게 된 것일까? 아마도 그 대답은 IT 테크놀로지 리뷰 전문가인 Matt Lake가 2014년 5월 21일자로 'Computerworld'에 기고한 "Why I'm sending back Google Glass"<sup>[1]</sup>라는 글에서 엿볼 수 있을 것 같다. 이 글은 Matt Lake가 Google Glass Explorer Program에 참여하여 3주간 Google Glass를 사용하여 본 후, 자신의 디바이스를 Google에 돌려보내며, 그 10가지 이유를 적은 것이다. 그 중 디바이스의 구현 기술 측면에서 중요한 의미를 갖는 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다.

**대부분의 한계들은 웨어러블 디바이스가 갖는 구현 상의 크기와 사용 가능한 에너지량 측면에서의 제약들로 인해 생겨난다.**

(1) Matt Lake는 Google Glass 디바이스의 주요 사용자 인터페이스인 음성 인식 기능의 반응성 및 정확도 문제를 지적하면서, 소다와 컵 케이크를 잔뜩 먹고 졸린 상태의 6살짜리 어린 아이와 같은 수준이라고 평가하고 있다. 이는 스마트폰과 같은 기존의 모바일 디바이스와 달리 그 크기와 착용 위치 면에서 제약을 가지는 웨어러블 디바이스들의 특성 상 직면하게 되는 사용자 인터페이스 문제를 단적으로 보여준다.

(2) 또한, Wi-Fi나 Bluetooth를 통해 음악을 듣고, 사진을 찍거나 동



제민규  
DGIST  
정보통신융합공학전공



영상을 촬영하다 보면 디바이스는 금새 뜨거워지고, 배터리는 금새 소모되어 약 한 시간 정도 후면 다시 충전을 해야한다고 이야기 한다. 이는 센싱, 프로세싱, 통신 등의 기능을 수행하기 위해 소모되는 에너지 측면에서의 한계를 의미한다. 웨어러블 디바이스들은 되도록 작고 얇게 구현되어야 하므로 장착된 배터리의 용량에 큰 제약이 있으므로 기존의 모바일 디바이스들에서 사용되던 기술을 그대로 적용해서는 그 에너지 소모량을 감당하기가 어렵다.

(3) 그리고, 멋진 디자인에 슬림한 바디를 가진 요즘 안경들에 비해 상당히 크고 투박해서 본인처럼 비교적 큰 얼굴을 가진 사람이 쓰고 있어도 매우 눈에 띈다는 점, 또 쓰지 않을 때 벗어서 보관하기에도 너무 크고 접히지도 않는다는 점들을 또 다른 이유로 꼽고 있다. 바로 웨어러블 디바이스들이 성공하기 위해 반드시 극복해야 할 크기의 제약을 이야기하고 있는 것이다.

(4) 또 한편으로, Google Maps와 연동하여 길찾기 서비스를 받을 수 있는 훌륭한 기능이 있으나, 스마트폰의 모바일 데이터 서비스나 모바일 핫스팟 기능을 이용하지 않으면 GPS를 동작시킬 수 없고, 만약 스마트폰과 연동하여 GPS를 동작시키면 배터리가 너무 빨리 소모되는 단점을 지적한다. 이는 웨어러블 디바이스가 가진 기능의 한계로 인해 스마트폰과 연동되어야만 비로소 수준 높은 기능들을 제공할 수 있음을 의미하며, 고성능의 센싱, 프로세싱, 통신 등을 수행하기에는 에너지 소모량 측면에서 심각한 한계가 있음을 다시 한 번 보여준다.

Google Glass 뿐만 아니라, 시중에 나와 팔리고 있는 손목 밴드 혹은 시계 형태의 다양한 제품들도 마찬가지로의 한계들로 인해 소비자들을 만족시키는데 실패하고 있다. 살펴본 바와 같이 대부분의 한계들은 웨어러블 디바이스가 갖는 구현 상의 크기와 사용 가능한 에너지량 측면에서의 제약들로 인해 생겨난다. 이처럼 현재의 웨어러블 디바이스들이 실패하는, 혹은 실패까지는 아니더라도 기대만큼 크게 성공하지 못하는 이유들로부터 웨어러블 디바이스를 구현함에 있어 마주하게 되는 중요한 기술적 한

계들을 찾을 수 있고, 그에 해당하는 극복 방안들을 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

- (1) 저전력으로 필요한 성능의 센싱 기능을 제공할 수 있는 기법의 개발
- (2) 저전력으로 필요한 성능의 프로세싱 기능을 제공할 수 있는 기법의 개발
- (3) 저전력으로 충분한 데이터량의 통신 기능을 제공할 수 있는 기법의 개발
- (4) 사용 가능한 에너지량을 증가시킬 수 있는 에너지 저장 및 충전 기법의 개발
- (5) 위의 기술들을 기반으로 구동이 편리한 새로운 사용자 인터페이스의 개발

이 글에서는 그 중에 특히 센싱, 프로세싱, 통신 기능들과 관련하여 웨어러블 디바이스 구현 상의 기술적 한계들을 극복하기 위해 적용될 수 있는 연구 및 개발 단계의 집적 회로 기술들을 소개하고자 한다.

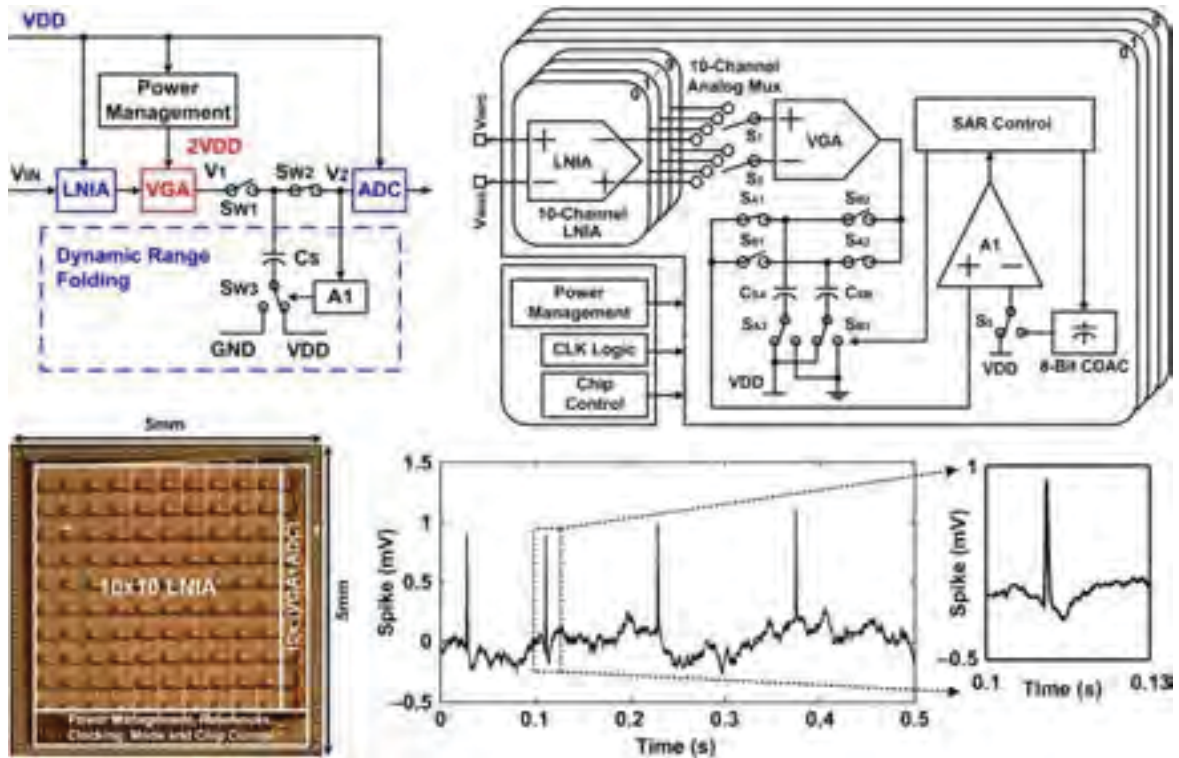
**적은 에너지를 소모하면서도 충분한 성능의 센싱 기능을 제공하기 위해서는 센서 기술뿐만 아니라 센서로부터 신호를 읽어내는 센서 인터페이스 집적 회로 기술이 중요한 역할을 하게 된다.**

## II. 차세대 웨어러블 디바이스를 위한 집적 회로 기술

### 1. 센서 인터페이스를 위한 집적 회로 기술

차세대 웨어러블 디바이스는 생체 신호, 온도, 압력, 조도, 가속도, 방향 등의 다양한 물리량들을 센싱하는 기능을 필요로 한다. 이 때, 적은 에너지를 소모하면서도 충분한 성능의 센싱 기능을 제공하기 위해서는 센서 기술뿐만 아니라 센서로부터 신호를 읽어내는 센서 인터페이스 집적 회로 기술이 중요한 역할을 하게 된다. <그림 1>에 보인 것은 매우 낮은 전력을 소모하면서도 성능의 저하 없이 생체 전위신호(biopotential)를 센싱할 수 있도록 개발된 회로이다.<sup>[2]</sup> Dual supply scheme과 dynamic range folding 기술을 개발하여 적용함으로써, 전력 소모를 최소화 하면서도 뛰어난 센싱 성능을 제공할 수 있도록 하였다.

저잡음 특성을 제공하여야 하므로 전류의 소모는 크지만 다루는 신호의 크기는 작은 low-noise instrumentation amplifier (LNIA) 회로와 전원 전압의



〈그림 1〉 0.45-V 100-channel neural recording IC with sub- $\mu$ W/channel consumption in 0.18- $\mu$ m CMOS<sup>[2]</sup>

크기에 의해 커패시터 어레이를 충전하고 방전하는데 소모되는 전력과 디지털 로직에서 소모되는 전력이 크게 영향을 받는 analog-to-digital converter (ADC) 회로에는 낮은 전원 전압 VDD를 사용하는 한편, 전체적인 잡음 특성에 영향을 거의 주지 않아 전류 소모는 매우 작지만 다루는 신호의 크기는 큰 variable gain amplifier (VGA) 회로에는 높은 전원 전압 2VDD를 사용함으로써, 총 전력 소모량은 크게 줄이면서도 센싱 성능은 그대로 유지할 수 있다. 하지만, 이처럼 dual supply scheme을 적용하기 위해서는 중요한 한 가지 기술적 문제를 해결하여야 하는데, 바로 VGA의 출력 신호와 ADC의 입력 신호 간에 존재하는 dynamic range mismatch 문제가 그것이다. 이를 해소하기 위하여 switched-capacitor 회로 기술을 적용한 dynamic range folding 기법을 제안하여 활용하였다.

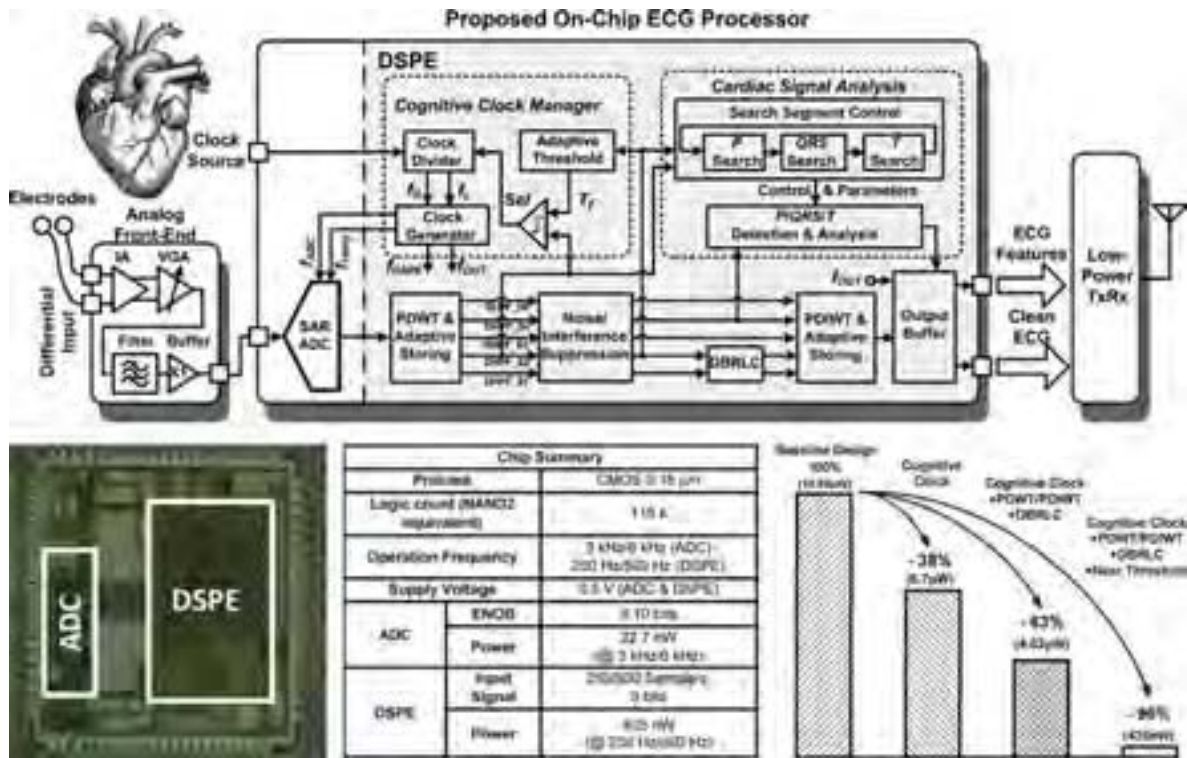
이처럼 dual supply scheme과 dynamic range folding 기법을 함께 적용함으로써, 전력 소모를 기존 구조의 절반 수준으로 낮출 수 있었다. 각 센싱 채널 당 전력 소모는 730 nW에 불과한 반면, 센싱 회로의 입력 잡

음 수준은 1 Hz부터 10 kHz까지의 주파수 대역에 걸쳐 측정하였을 때 3.2  $\mu$ Vrms, effective number of bits (ENOB) 성능은 8.3 bits로 기존 구조 대비 동등 이상의 성능을 확보하였다. 〈그림 1〉에서 볼 수 있듯이, 개발된 회로를 집적함으로써 한 개의 칩을 사용하여 100개의 채널로부터 뇌 신호를 측정할 수 있도록 구성하였으며, 실제 이를 사용한 동물 실험을 통해 쥐의 뇌로부터 성공적으로 뇌 신호를 측정할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 디지털 신호 처리를 위한 집적 회로 기술

센서를 통해 획득한 물리량에 관한 신호들을 처리하여 유용한 정보를 추출하고 사용자에게 알리는 것은 웨어러블 디바이스가 제공해야 할 중요한 기능 중의 하나이다. 〈그림 2〉에 보인 것은 사용자의 심전도(ECG) 신호를 다양하게 분석함으로써 유용한 정보들을 제공하는 한편, 각종 저전력 회로 기술들을 적용함으로써 매우 낮은 에너지만을 소모하도록 한 다기능 심전도 분석 디지털 신호 처리 집적 회로이다.<sup>[3]</sup>





(그림 2) 457-nW near-threshold cognitive multi-functional ECG processor for real-time ambulatory cardiac monitoring<sup>[3]</sup>

개발된 신호 처리 집적 회로는 심전도 신호의 P파, QRS군, T파를 감지하고 P-R 간격, R-T 간격, T-P 간격을 계산하며, 이와 같은 파라미터들을 이용하여 심전도 파형 분석을 수행하는 것은 물론, 잡음이나 간섭 신호들을 제거하여 깨끗한 심전도 신호를 재생산하는 등 실시간 심전도 분석에 필요한 다양한 기능들을 사용자에게 제공한다. 한편, 에너지 소모를 줄여 배터리 수명을 최대화하기 위해 여러 가지 저전력 기술들이 제안 및 사용되었다. 아키텍처 수준에서는 현재 획득 중인 심전도 신호의 특성을 파악하여 이에 따라 요구되는 신호 처리 시의 temporal resolution에 따라 시스템 동작 clock의 주파수를 실시간으로 조정하는 cognitive clocking 기법이 사용되었으며, 이는 신호 처리 회로와 함께 집적된 ADC 회로에도 적용되었다. 또한, pseudo-downsampling wavelet transform 및 inverse wavelet transform 기법, adaptive sorting 기법, 그리

**센서를 통해 획득한 물리량에 관한 신호들을 처리하여 유용한 정보를 추출하고 사용자에게 알리는 것은 웨어러블 디바이스가 제공해야 할 중요한 기능 중의 하나이다.**

고 denosing-based run-length compression 기법들을 적용함으로써 신호 처리를 위해 필요한 storage unit의 개수는 물론 그 access 빈도를 최소화 하면서도 신호 처리 성능의 저하를 피할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라, 심전도 신호 분석 회로의 구조를 단순화하고, 같은 회로를 재구성하여 P구역, QRS구역, T구역의 분석에 순차적으로 이용할 수 있도록 함으로써 에너지 소모는 물론 실리콘 면적의 소모 또한 최소화 하였다. 아키텍처 수준뿐만 아니라 회로 수준에서도, 트랜지스터의 threshold voltage 근처에서 동작하게 함으로써 동작 전압을 크게 낮추는 저전압 설계 기법, 매우 낮은 전력을 소모하면서도 super-threshold 영역의 I/O 전압과 near-threshold 영역의 core 전압 간 변환을 효과적으로 수행할 수 있는 새로운 level shifter 회로 기술 등 다양한 저전력 회로 설계 기법들을 활용하였다.



이와 같이 설계한 신호 처리 집적 회로를 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS 공정을 이용하여 구현한 결과, 아키텍처 및 회로 수준에서 각종 저전력 기법들을 적용하기 전과 비교하여 총 전력 소모가 4% 수준으로 크게 낮아져 무려 96%의 전력 소모를 줄일 수 있었다. 0.5 V의 전원 전압을 이용하여 457 nW의 매우 낮은 전력만을 소모하면서 동작하며, 심전도 분석에 필요한 다양한 기능들을 성공적으로 제공하는 것을 확인하였다.

### 3. 데이터 통신을 위한 집적 회로 기술

차세대 웨어러블 디바이스에 있어 그 유용성과 편의성을 모두 확보하기 위해서는 웨어러블 디바이스 간에 필요한 정보를 충분히 교환할 수 있으면서도 그 통신에 소요되는 전력을 최소화함으로써 긴 배터리 수명을 보장할 수 있는 기술이 반드시 필요하다. 대기 중에 전자파를 송신하고 수신하는 방식으로 통신하는 기존의 무선 통신 방식 대신, 웨어러블 디바이스가 갖는 특성을 살려 사람의 몸을 매질로 하는 인체 채널 통신 방식을 사용하면, 통신을 위해 소모되는 전력을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 상당한 크기의 안테나 구조를 필요로 하지 않아 디바이스의 크기를 더욱 작게 할 수 있으며, fading effect로부터도 자유로워 여러 가지 장점을 누릴 수 있다. 이와 같이 인체를 매질로 하여 아주 낮은 전력만을 소모하면서도 멀티미디어 데이터를 주고받기에 충분한 전송 속도를 제공할 수 있도록 개발된 인체 채널 통신용 송수신 집적 회로를 <그림 3>에 보였다.<sup>[4]</sup>

먼저 송신기를 살펴보면, 16-bit Walsh code modulation을 이용한 direct digital signaling 방식을 채용하고 있다. 16개의 Walsh code들 중 7번부터 14번까지의 code들을 사용하면 대부분의 출력 신호 에너지를 35 MHz부터 75 MHz까지의 주파수 대역에 집중시킬 수 있게 되는데, 이렇게 함으로써 인체 채널의 유한한 대역폭을 효과적으로 활용하는 한편, FM 대역으로부터의 간섭을 피할 수 있다. 이 때, 데이터 전송 속도를 향상시키기 위해 두 가지 기법들을 적용한다. 그 하나는 Walsh

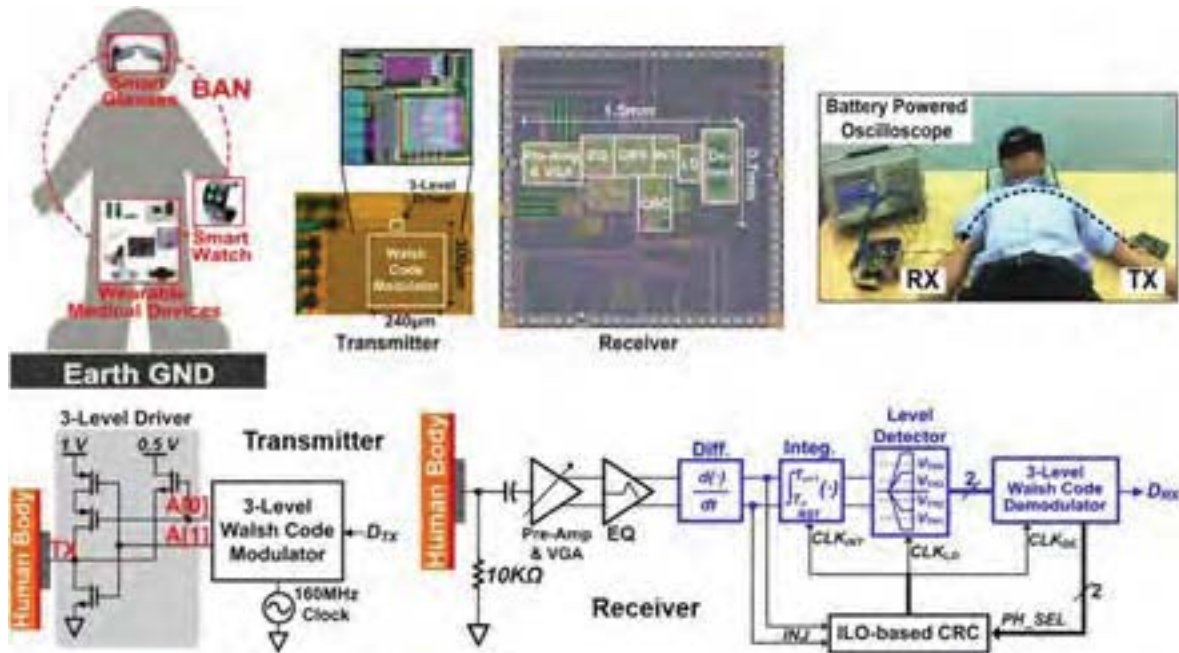
code 7번부터 14번까지의 inverse code를 함께 활용함으로써 사용하는 Walsh code의 set을 두 배로 확장하는 기법이고, 나머지 하나는 이렇게 확보한 16개의 Walsh code들을 두 개의 그룹으로 나눈 후 서로 더하여 2-bit Walsh code 신호를 생성함으로써 3 level의 크기를 갖는 신호로 통신을 하는 기법이다. 이렇게 함으로써, 사용하는 클럭의 주파수나 Walsh code의 개수를 증가시키지 않고도 높은 전송 속도를 얻을 수 있어 통신 에너지 효율을 극대화할 수 있다. 3-level Walsh code modulator에서 나온 2-bit 신호는 3-level driver 회로를 통해 3-level 아날로그 신호의 형태로 송신된다.

저전력 고속 전송 수신기를 구현하기 위해서는 크게 세 가지 새로운 회로 기술들이 적용되었다. (1) 우선 수신기의 입력 임피던스로서 10 k $\Omega$  정도의 높은 값을 사용함으로써 인체 채널 통신 시 path loss를 줄일 수 있었다. (2) 수신기 구조로는 transient detection 방식의 구조를 사용하였는데, 이는 인체 채널이 band-pass 특성을 가지므로 인체를 통과하여 수신기에 다다른 신호는 DC level 정보를 잃게 되고, 따라서 기존의 amplitude detection 방식의 수신기로는 신호를 제대로 복구해낼 수 없기 때문이다. Transient detection 방식의 수신기를 구현하기 위해 앞단의

**웨어러블 디바이스 간에 필요한 정보를 충분히 교환할 수 있으면서도 그 통신에 소요되는 전력을 최소화함으로써 긴 배터리 수명을 보장할 수 있는 기술이 반드시 필요하다.**

amplifier 회로에 의해 증폭된 신호가 differentiator 회로를 통과하도록 하고 이를 다시 integrator 회로를 이용해 처리함으로써 3-level 신호를 복구해낸 후 level detector를 이용해 level 정보를 추출해내도록 하였다. 또한, equalizer를 사용함으로써 고주파 대역에서 발생하는 추가의 path loss를 compensation하여 보다 넓은 채널 대역폭을 얻을 수 있도록 하였다. (3) 끝으로, integrator 회로와 level detector 회로에 필요한 timing 신호를 얻기 위해 injection-locking 기반의 clock recovery 회로를 사용하였는데, 이렇게 함으로써 전력 소모가 큰 phase-locked loop 회로나 상당한 면적을 차지하는 crystal oscillator 회로의 사용을 피할 수 있었다.

인체 채널 통신용 송수신 집적 회로를 65-nm CMOS



〈그림 3〉 60-Mb/s wideband body-channel communication transceiver with 150-pJ/b RX and 31-pJ/b TX<sup>[4]</sup>

공정을 이용하여 제작한 결과, 송신기의 경우는 1.85 mW, 수신기의 경우는 9 mW의 낮은 전력을 소모하면서도 60 Mb/s의 높은 전송 속도로 통신할 수 있었다. 이는 매우 높은 통신 에너지 효율을 의미하는 것으로 송신기의 경우는 31 pJ/b, 수신기의 경우는 150 pJ/b에 해당한다. 〈그림 3〉에 보인 바와 같이 실제 인체를 통하여 높은 전송 속도로 멀티미디어 데이터를 전송하는 실험을 성공적으로 수행하였다.

### III. 결론 및 향후 전망

스마트폰으로 대표되는 모바일 디바이스와 견주어 웨어러블 디바이스는 훨씬 작은 크기로 구현되어야 하며, 따라서 배터리 등으로부터 공급되는 에너지의 양도 심각하게 제한된다. 따라서 기존의 모바일 디바이스들을 위해 개발된 집적 회로들을 사용하여 구현된 현재의 웨어러블 디바이스들은 사용자에게

제공할 수 있는 기능들이 너무 단순하여 유용성이 떨어지거나, 배터리 수명이 너무 짧아 편의성 측면에서 심각한 문제를 갖는다. 이러한 기술적 한계들을 극복하고 사용자가 만족할 수 있는 웨어러블 디바이스를 구현하기 위해서는 이 글에 소개된 바와 같이 현재 모바일 디바이스들에 적용되고 있는 기술들보다 훨씬 낮은 전력만을 소모하면서도 필요한 성능의 센싱, 프로세싱, 통신 기능들을 구현할 수 있도록 한 단계 더 발전된 집적 회로 기술들이 개발되고 적용되어야 한다. 그리고 이와 같은 집적 회로 기술의 발전과 더불어, 사용 가능한 에너지량을 증가시킬 수 있는 에너지 저장 및 충전 기법의 개발, 웨어러블 디바이스의 편리한 구동을 가능하게 하는 새로운 사용자 인터페이스의 개발 등이 성공적으로 이루어져야만 웨어러블 디바이스가 우리의 생활 속에서 현재의 스마트폰처럼 널리 사용되는 날이 올 것이다.

현재 모바일 디바이스들에 적용되고 있는 기술들보다 훨씬 낮은 전력만을 소모하면서도 필요한 성능의 센싱, 프로세싱, 통신 기능들을 구현할 수 있도록 한 단계 더 발전된 집적 회로 기술들이 개발되고 적용되어야 한다.



### 참고 문헌

- [1] M. Lake, "Why I'm sending back Google Glass," Computerworld, May 21, 2014. (<http://www.computerworld.com/article/2489585/emerging-technology/why-i-m-sending-back-google-glass.html>)
- [2] D. Han, Y. Zheng, R. Rajkumar, G. Dawe, and M. Je, "A 0.45V 100-Channel Neural Recording IC with Sub-mW/Channel Consumption in 0.18µm CMOS," in IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, Feb. 2013, pp. 290-291.
- [3] X. Liu, J. Zhou, Y. Yang, B. Wang, J. Lan, C. Wang, J. Luo, W. L. Goh, T. T.-H. Kim, and M. Je, "A 457-nW Near-Threshold Cognitive Multi-Functional ECG Processor for Long-Term Cardiac Monitoring," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 49, no. 11, pp. 2422-2434, Nov. 2014.
- [4] J. Lee, V. V. Kulkarni, C. K. Ho, J. H. Cheong, P. Li, J. Zhou, W. Toh, X. Zhang, Y. Gao, K.-W. Cheng, X. Liu, and M. Je, "A 60Mb/s Wideband BCC Transceiver with 150pJ/b RX and 31pJ/b TX for Emerging Wearable Applications," in IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, Feb. 2014, pp. 498-499.



제민규

- 1994년 2월 KAIST 전기및전자공학과 학사
- 1996년 2월 KAIST 전기및전자공학과 석사
- 2003년 8월 KAIST 전기및전자공학과 박사
- 2003년 6월 ~ 2006년 4월 삼성전자 책임연구원
- 2006년 6월 ~ 2008년 3월 Institute of Microelectronics, Singapore, Senior Research Engineer
- 2008년 4월 ~ 2012년 3월 Institute of Microelectronics, Singapore, Principal Investigator
- 2012년 4월 ~ 2014년 2월 Institute of Microelectronics, Singapore, Department Head
- 2010년 7월 ~ 2014년 2월 National University of Singapore, Adjunct Assistant Professor
- 2014년 3월 ~ 현재 DGIST 부교수

〈관심분야〉

Smart sensor interface IC solutions, Low-power wireless IC solutions, Microsystem integration (biomedical devices, wireless sensor nodes, wearables)